

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA – DAELT
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO ROMANIV DA SILVA
FELIPE FERRAZ CIPRIANO**

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE SUPERVISÃO NO ESTUDO DE
MÁQUINAS SÍNCRONAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

BRUNO ROMANIV DA SILVA

FELIPE FERRAZ CIPRIANO

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE SUPERVISÃO NO ESTUDO DE
MÁQUINAS SÍNCRONAS**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Metodologia Aplicada ao TCC, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Cesar Betini

Co-orientador: Prof. Me. Marcelo Barcik

CURITIBA

2017

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE SUPERVISÃO NO ESTUDO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 19 de junho de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

Roberto Cesar Betini, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Roberto Cesar Betini, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-Orientador

Marcelo Barcik
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberto Cândido, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

OBS: A folha de aprovação assinada se encontra na coordenação do curso.

RESUMO

SILVA, Bruno Romaniv da; CIPRIANO, Felipe Ferraz. **Aplicação de sistemas de supervisão no estudo de máquinas síncronas**. 2017. 67 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um supervisor para realizar medições de corrente, tensão e rotação de máquinas elétricas síncronas. O supervisor foi desenvolvido no software Eclipse e apresenta, de maneira gráfica e numérica, medições realizadas durante práticas laborais de máquinas elétricas. Para tal, foram desenvolvidos sensores que, acopladas a máquinas elétricas no laboratório, coletam os dados previamente requisitados e entregam esses dados ao sistema de supervisão através do protocolo Modbus serial. O sistema foi testado com um gerador síncrono alimentando uma carga isolada na qual foram efetuadas medições em tempo real.

Palavras-chave: Supervisor. Máquinas. Medições. Experimento

ABSTRACT

SILVA, Bruno Romaniv da; CIPRIANO, Felipe Ferraz. **Application of supervision systems in the study of synchronous machines.** 2017. 67 pages. Final course assignment (Bachelor of Electrical Engineering) - The Federal University of Technology Paraná. Curitiba.

The aim of this project is to develop a supervisory system to perform current, voltage and rotation measurements on synchronous electrical machines. The supervisory system will be developed with the use of the software Elipse and will graphically and numerically present measurements performed during practical experiments on electrical machines. For that aim, sensors attached to the laboratory machines were elaborated to acquire previously required data and send it to the supervisory system through a Modbus serial protocol. The system was tested on a synchronous generator supplying an isolated load in order to acquire real-time measurements of the load variables.

Keywords: Supervisory. Machines. Measurements. Experiment

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tela de supervisão de um parque eólico.	9
Figura 2 - Partes constituintes da máquina síncrona.	14
Figura 3 - Enrolamento do rotor.	14
Figura 4 - Rotor de polos salientes (a), Rotor de polos lisos (b).....	15
Figura 5 - Forma de onda de um sistema trifásico.	16
Figura 6 - Enrolamento motor trifásico.	17
Figura 7 - Comparativo entre motores.....	19
Figura 8 - Modelo de motor com excitatriz estática.....	20
Figura 9 - Modelo de motor com excitatriz brushless.....	21
Figura 10 - Sistema de controle por malha fechada.....	26
Figura 11 - Sistema de controle por malha aberta.	27
Figura 12 – Voltímetro.....	29
Figura 13 - Amperímetro	30
Figura 14 - Arduino Uno.....	32
Figura 15 - Pinagem ATmega328 usado no Arduino UNO.....	33
Figura 16 - Pinos de entrada e saída no Arduino UNO R3.....	33
Figura 17– Tela desenvolvida em um SCADA.....	35
Figura 18 - Componentes do projeto.....	39
Figura 19 - Entrada de tensão do protótipo.....	40
Figura 20 - Fixação sensor de rotação.....	41
Figura 21 - Fixação sensor de corrente.....	41
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento.....	42
Figura 23 - Arduino Uno R3.....	43
Figura 24 - Código comunicação ModbusSerial.....	44
Figura 25 - Tela inicial do supervisor desenvolvido.	46
Figura 26 - Tela de gráficos do supervisor desenvolvido.....	47
Figura 27 - Tela de Login do supervisor desenvolvido.	48
Figura 28 - Tela de alarmes do supervisor desenvolvido.	49
Figura 29 - Sensor de tensão GBK P8.	50
Figura 30 - Curva medição sensor P8.....	50
Figura 31 - Circuito do sensor de tensão.....	51
Figura 32 - Código sensor de tensão.	52
Figura 33 - Fixação sensor de corrente.....	53
Figura 34 - Código sensor de corrente.....	54
Figura 35 - Alimentação sensor de rotação.....	55
Figura 36 - Código sensor de rotação.	56
Figura 37 - Banco de dados – Alarmes.	58

Figura 38 - Comparação supervisorio com multímetro.....	60
Figura 39 - Comparação supervisorio com amperímetro.	61
Figura 40 - Comparação supervisorio e tacômetro.	61
Figura 41 - Tabela comparativa.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
FP	Fator de Potência
V_L	Tensão da carga
I_L	Corrente da carga
RPM	Rotações por minuto
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	6
1.1.	CONTEXTO	6
1.2.	DELIMITAÇÃO DO TEMA	8
1.3.	PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.4.	OBJETIVOS	11
1.4.1.	Objetivo geral	11
1.4.2.	Objetivos específicos	11
1.5.	JUSTIFICATIVA	11
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1.	MÁQUINAS SÍNCRONAS	13
2.2.	MÁQUINAS SÍNCRONAS FUNCIONANDO COMO MOTOR	16
2.2.1.	Velocidade síncrona	17
2.2.2.	Vantagens	18
2.2.3.	TIPOS DE EXCITAÇÃO	19
2.2.3.1.	Excitatriz Estática (com escovas)	19
2.2.3.2.	Excitatriz <i>Brushless</i> (sem escovas)	20
2.3.	MÁQUINAS SÍNCRONAS FUNCIONANDO COMO GERADOR	21
2.3.1.	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	22
2.3.2.	TIPOS DE EXCITAÇÃO	22
2.3.1.1.	SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO	22
2.3.1.2.	SISTEMA DE EXCITAÇÃO <i>BRUSHLESS</i>	23
3.	AUTOMAÇÃO E SUPERVISÓRIOS	24
3.1.	CONTROLE E AUTOMAÇÃO	24
3.2.	INSTRUMENTAÇÃO	25
3.2.1.	VOLTÍMETRO	28
3.2.2.	AMPERÍMETRO	29
3.2.4.	Arduino	31
3.3.	<i>SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION</i>	34
4.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	39
4.1.	FUNCIONAMENTO BÁSICO	40
4.2.	COMPONENTES DO SISTEMA	43
4.2.1.	CONTROLADOR	43
4.2.2.	SOFTWARE DE SUPERVISÃO	45
4.2.2.1.	TELA INICIAL	46
4.2.2.2.	TELA DE GRÁFICOS	47
4.2.2.3.	TELA DE LOGIN	48
4.2.2.4.	TELA DE ALARMES	48

4.2.3.SENSOR DE TENSÃO.....	49
4.2.4.SENSOR DE CORRENTE	52
4.2.5.SENSOR DE ROTAÇÃO.....	54
4.2.6.BANCO DE DADOS.....	56
5.RESULTADOS OBTIDOS	59
6.CONCLUSÃO	63
6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICE A – ROTEIRO DE UM ENSAIO	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

Máquinas elétricas são mecanismos destinados a uma transformação que envolve energia elétrica. Do ponto de vista funcional, em geral, elas são classificadas em: Geradores, Motores e Conversores.

Geradores são máquinas que transformam energia mecânica em energia elétrica. No contexto de geradores podemos citar a máquina síncrona, que é uma máquina alimentada em corrente alternada que tem sua velocidade proporcional à frequência desta corrente. O seu rotor em conjunto com o campo magnético criado giram na mesma velocidade ou sincronismo que o campo magnético (VAZ, 2010). Os geradores de corrente alternada podem também ser chamados de alternadores, sendo esta máquina elétrica responsável pela geração de praticamente toda a energia elétrica consumida nas residências e indústrias.

Motores são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica. Um motor síncrono tem como uma de suas aplicações o controle do fator de potência, absorvendo potência reativa da rede e tem a vantagem de simultaneamente poder acionar uma carga no eixo. Caracteriza-se por ter a mesma velocidade de rotação do campo girante da armadura em regime permanente e por não possuir conjugado de partida (CARVALHO, 2007). Na prática, uma das maneiras da partida do motor é feita como a de um motor assíncrono e posteriormente excita-se o indutor, energizando o enrolamento de campo com corrente contínua de forma a sincronizá-lo.

Conversores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica, tendo em vista que o fornecimento de energia elétrica é feito, majoritariamente, a partir de uma rede de distribuição de corrente alternada, devido principalmente à facilidade do controle da tensão através de transformadores. Os conversores funcionam geralmente para transformar corrente alternada em corrente contínua para ser usada em diversos equipamentos.

Na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, o estudo de máquinas elétricas é dividido entre três disciplinas principais: Máquinas elétricas 1, Máquinas elétricas 2 e Máquinas elétricas 3.

Máquinas elétricas 1 tem como ementa a revisão de circuitos e materiais eletromagnéticos, transformadores monofásicos e trifásicos, autotransformadores e transformadores especiais.

Máquinas elétricas 3 tem como ementa máquinas assíncronas de indução monofásicas e trifásicas e máquinas de CC. A disciplina de Máquinas elétricas 2, tem como ementa conceitos teóricos de máquinas síncronas, geradores CC, motores em CC, além disso, são ministradas aulas práticas de laboratório. Este trabalho será desenvolvido com base nos conceitos e ensaios de Máquinas Síncronas que são estudados na disciplina de máquinas elétricas 2.

Os três ensaios mais importantes da referida matéria são:

- Ensaio de um gerador síncrono alimentando uma carga isolada.
- Máquina síncrona operando em paralelo com o sistema elétrico de potência.
- A curva de excitação de uma máquina síncrona.

Podemos também destacar outros ensaios desenvolvidos no laboratório, sendo eles:

- Controle de velocidade em motores CC.
- Curvas (VL x IL) para geradores CC com excitação independente.
- Curvas (VL x IL) para geradores CC autoexcitados.

Os conceitos apresentados na disciplina podem ser relacionados diretamente às máquinas presentes na geração de energia elétrica.

O processo de geração de energia geralmente ocorre em dois estágios: no primeiro estágio uma máquina primária transforma um tipo de energia, como por exemplo, hidráulica, em energia cinética de rotação. No segundo estágio um gerador acoplado à máquina primária transforma a energia cinética de rotação em energia elétrica (VAZ, 2010).

Em uma usina hidrelétrica geralmente existe uma equipe de funcionários responsáveis pelas manobras nos equipamentos, pela manutenção, pelas paradas e partidas programadas, pelo restabelecimento em caso de desligamento de alguns ou de todos os equipamentos da usina. Para o bom funcionamento de uma usina hidrelétrica é fundamental a implantação de sistemas de supervisão que faz o controle dos equipamentos, máquinas, vertedouros, comportas, etc.

Antes do surgimento de sistemas de controle avançado, esses procedimentos eram realizados por comandos manuais, diretamente pelo operador, além do desperdício de dinheiro, o controle apenas por operadores gera riscos e pode comprometer o sistema elétrico de potência.

Atualmente, com a busca constante por novas tecnologias e atualização dos sistemas, a utilização de sistemas de controle e supervisão remoto permite que comandos e manobras sejam realizados automaticamente e/ou diretamente por um computador, sem a necessidade da presença do operador no local de manobra ou mesmo da necessidade da presença constante dele na usina.

O monitoramento constante de grandes usinas tem sido parte importante do processo de geração. Assim, a modernização do sistema de supervisão e controle possibilita que todo o processo seja acompanhado em tempo real e remotamente, o que melhora a segurança de operação, aumenta a vida útil dos equipamentos e também facilita a manutenção.

Conceitualmente, a operação de qualquer usina hidrelétrica deve ser realizada obedecendo-se, rigorosamente, às regras operativas constantes dos manuais elaborados especificamente para esse fim, com vistas a garantir o funcionamento adequado e o desempenho satisfatório das diversas estruturas e equipamentos existentes (ELETROBRÁS, 2000).

1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

A disciplina de Máquinas Elétricas 2, ministrada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, tem como ementa os seguintes elementos: princípio da conversão eletromecânica de energia, introdução ao estudo das máquinas de corrente contínua e máquinas síncronas. Dentro desses conceitos é apresentada aos alunos uma série de atividades práticas desenvolvidas dentro do laboratório.

Essas atividades práticas são modelos reduzidos de máquinas elétricas como geradores que são ligados no sistema elétrico de potência, sendo esses monitorados e controlados por sistemas de controle e supervisão ou sistemas supervisórios.

Os sistemas supervisórios podem ser vistos como sistemas que supervisionam e controlam processos executados em uma planta industrial através da visualização de variáveis advindas do campo, bem como a visualização das

ações tomadas e configuração da estratégia de controle implementada (ZEILMANN, 2002).

Essas informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e em seguida, manipulados, analisados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Além disso, os sistemas supervisórios são capazes de executar diagnósticos com base nas medições executadas. Esses sistemas também são chamados de SCADA (*Supervisory Control & Data Acquisition Systems*).

Podemos observar na Figura 1, um exemplo de tela de supervisão de um parque eólico, onde são apresentadas ao usuário as principais informações do sistema, como abertura e fechamento de chaves seccionadoras e disjuntores, informações de alarmes, entre outros.

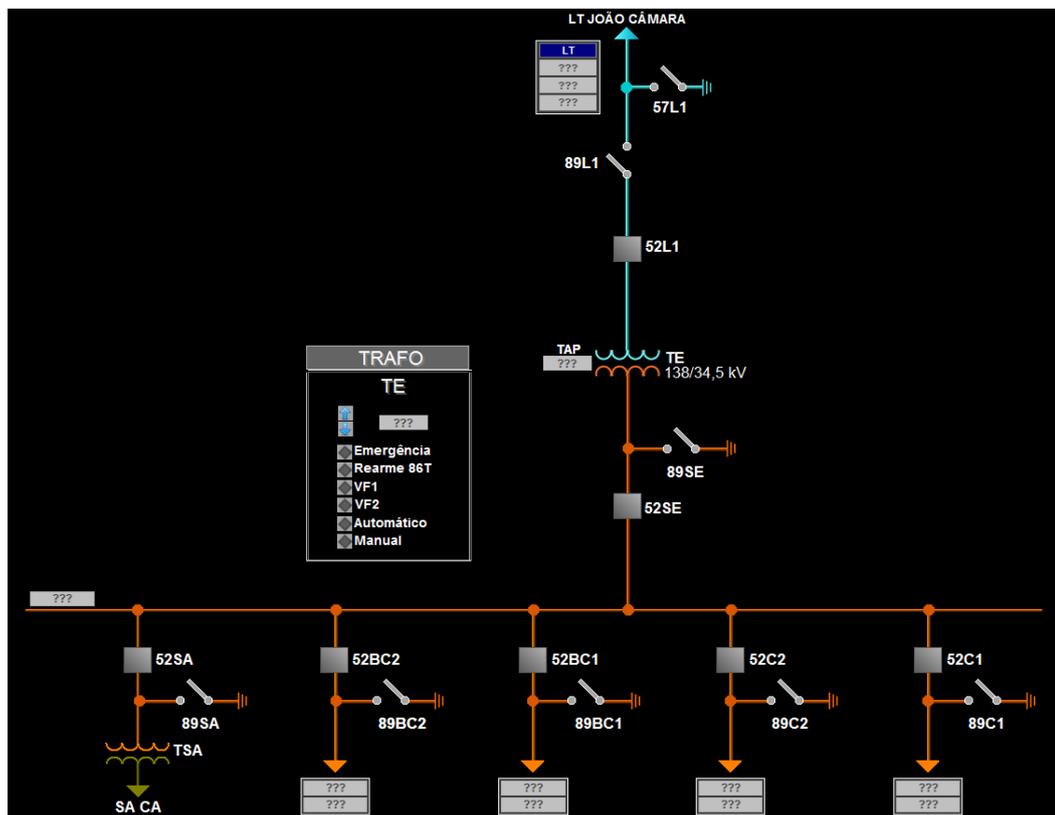


Figura 1 - Tela de supervisão de um parque eólico.
Fonte: Autoria própria, 2016.

Existem diversos desenvolvedores de softwares que realizam essa função de supervisão, dentre eles está a Elipse, uma empresa que está no ramo de supervisão e controle há mais de 20 anos. O software Elipse E3 é a terceira geração

de sistemas HMI/SCADA da Elipse Software e é aplicável a processos de qualquer natureza (KICHALOWSKY, 2011). O Elipse E3, além de outras diversas aplicações na indústria, pode ser utilizado para desenvolvimento de supervisórios para usinas hidrelétricas e pode também ser um ótimo software para o ensino dos conceitos de supervisão e controle.

1.3. PROBLEMAS E PREMISAS

No estudo da disciplina de máquinas elétricas 2 é perceptível a dificuldade dos alunos em associar que o conteúdo ministrado nas aulas também pode ser realizado através de automação.

Além disso, em uma aula de máquinas elétricas nem sempre o aluno consegue associar o aprendizado a uma máquina elétrica real, como as utilizadas em usinas hidrelétricas e indústrias, pois geralmente a ementa das disciplinas de máquinas elétricas não contempla a abordagem de casos reais e/ou visitas técnicas.

A utilização de um software de supervisão e controle trará melhorias para os experimentos realizados no laboratório.

Ao apresentar aos alunos um software de supervisão aplicado à prática, com o processamento de medições importantes para o estudo da máquina como a tensão, a corrente e a velocidade, além do desenvolvimento de um supervisório com todas estas e demais informações pertinentes ao controle de uma máquina elétrica, tende-se a ampliar a capacidade dos alunos de associar a matéria teórica à vida real.

O supervisório a ser desenvolvido poderá ser uma nova ferramenta de aprendizado nas matérias de máquinas e em outras matérias também, pois será disponibilizada com uma interface visual amigável ao usuário e com uma plataforma disponível ao acesso de todos, podendo despertar um maior interesse, tanto de alunos como de professores.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo geral

Desenvolver um supervisor para ser aplicado nas experiências e práticas realizadas com máquinas síncronas no laboratório da disciplina de máquinas elétricas 2.

1.4.2. Objetivos específicos

- Levantar os recursos do software Elipse E3;
- Avaliar os equipamentos disponíveis no laboratório de máquinas elétricas da UTFPR, Curitiba – Centro;
- Analisar a interface entre a bancada e o sistema de supervisão;
- Desenvolver um supervisor com uma interface para um Arduino.
- Desenvolver o ensaio de um gerador síncrono alimentando uma carga resistiva utilizando o supervisor para efetuar as medições em tempo real das variáveis da carga.
- O supervisor proposto será associado à instrumentação instalada na máquina síncrona e esta instrumentação irá prover as informações necessárias para disponibilizar ao usuário os gráficos e medições desejadas para cada roteiro.

1.5. JUSTIFICATIVA

Apesar da metodologia adotada atualmente pelos professores da disciplina de máquinas elétricas 2 ser eficaz e bem estruturada, é possível modernizar o ensino para apresentar ferramentas aos alunos que facilitem o entendimento da teoria dada em sala de aula.

A tecnologia de supervisão é amplamente aplicada e consolidada no mercado de energia elétrica e em outros setores. A aproximação do aluno com essa

tecnologia pode fornecer oportunidades no mercado de trabalho que muitas vezes não é apresentada no decorrer da disciplina.

Dessa maneira, temos por objetivo desenvolver um sistema supervisório que o aluno possa usar na disciplina de máquinas elétricas, mas que também possa abrir seu campo de visão para que ele possa utilizar os mesmos conceitos em outras áreas que dependem do uso de supervisão e controle.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será composto de cinco capítulos. O primeiro capítulo se destina à introdução sendo subdividido em tema, problema, objetivo geral e objetivos específicos e justificativa.

O segundo capítulo irá explicar o funcionamento de máquinas síncronas, as diferenças entre elas, sua aplicação e dados que são utilizados para realizar o seu controle.

O terceiro capítulo abordará a automação e sistemas supervisórios, desde o seu início até as aplicações mais complexas utilizadas atualmente em indústrias e concessionárias de energia.

O quarto capítulo irá apresentar o projeto do supervisório proposto e a forma que este será aplicado em máquinas síncronas para a realização de práticas laboratoriais.

Por fim, o quinto capítulo irá conter as considerações finais obtidas através do desenvolvimento do trabalho realizado.

Nos anexos 1,2 e 3 apresentaremos os roteiros das atividades práticas a serem realizadas pelo supervisório.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do trabalho proposto, é necessária uma contextualização teórica sobre os assuntos a serem abordados. Como os ensaios a serem desenvolvidos contam com geradores síncronos e máquinas síncronas, é de extrema importância saber como funcionam essas máquinas e geradores de uma maneira geral.

2.1. MÁQUINAS SÍNCRONAS

O termo Síncrono tem sua origem no Grego, onde o prefixo SIN significa “com” e CRONOS é uma palavra que denota “tempo”. Segundo o vocabulário eletrotécnico internacional, “uma máquina síncrona é uma máquina de corrente alternada na qual a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante”.

Máquina síncrona também pode ser definida como “aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento da armadura e uma excitação CC é fornecida ao enrolamento de campo” (FITZGERALD, 2006).

As máquinas síncronas são as mais importantes fontes de geração de energia elétrica. Segundo o Dr. Fábio Bertequini Leão, aproximadamente 99% da potência gerada no Brasil é realizada através de máquinas síncronas.

Além dos geradores síncronos, os motores síncronos também são muito utilizados, tanto pela característica de possuírem uma velocidade garantida em função da frequência, como pela característica, de resto comum aos dois modos de funcionamento, do seu fator de potência ser regulável.

As máquinas síncronas são constituídas pelo rotor e pelo estator. Como pode ser observado na Figura 2, no rotor está montado o enrolamento indutor que é percorrido por corrente contínua e tem como função a criação de um campo magnético intenso. No estator estão montados os enrolamentos induzidos nos quais se efetua a conversão eletromecânica de energia. As correntes e tensões, em regime permanente, são alternadas no estator e contínuas no rotor.

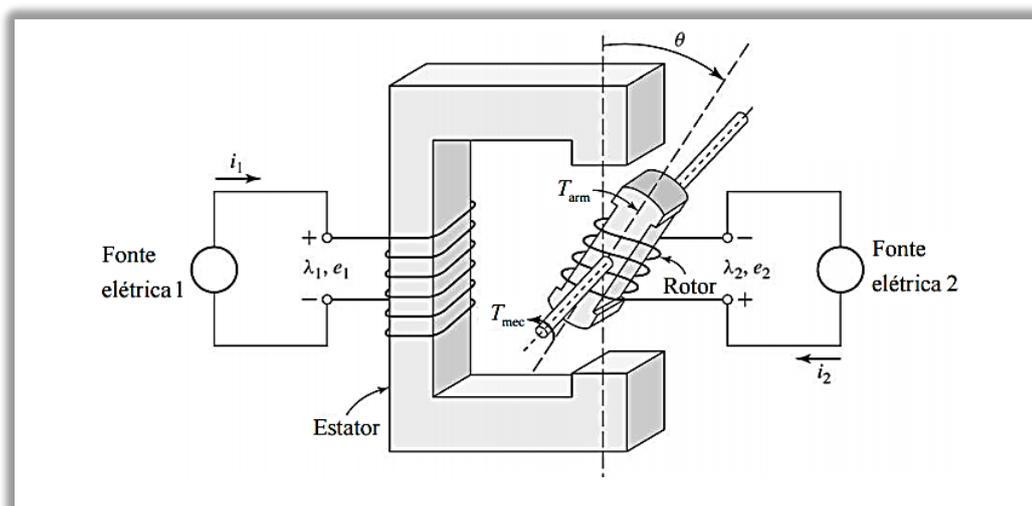


Figura 2 - Partes constituintes da máquina síncrona.
 Fonte: LEÃO, 2016.

O rotor é montado sobre um eixo, e é livre para girar entre os polos do estator, também de forma geral, existem enrolamentos transportando corrente elétrica tanto no estator como no rotor. O enrolamento do rotor pode ser alimentado através de anéis coletores e escova de grafite, como pode ser visualizado na Figura 3 (LEÃO, 2016).

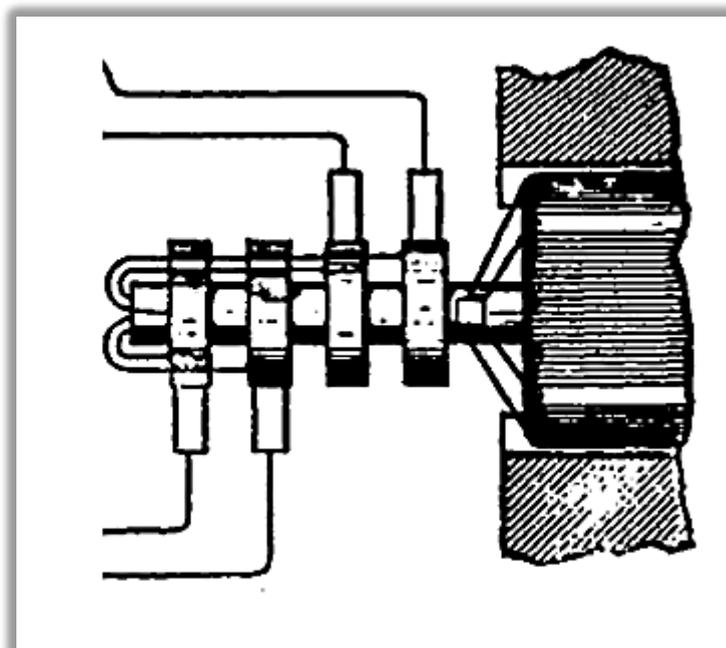


Figura 3 - Enrolamento do rotor.
 Fonte: LEÃO, 2016.

Normalmente, o rotor pode se apresentar de duas formas diferentes. Existe rotor de polos lisos e rotor de polos salientes, conforme Figura 4, nas máquinas de pequena potência usam-se também rotores constituídos por ímãs permanentes.

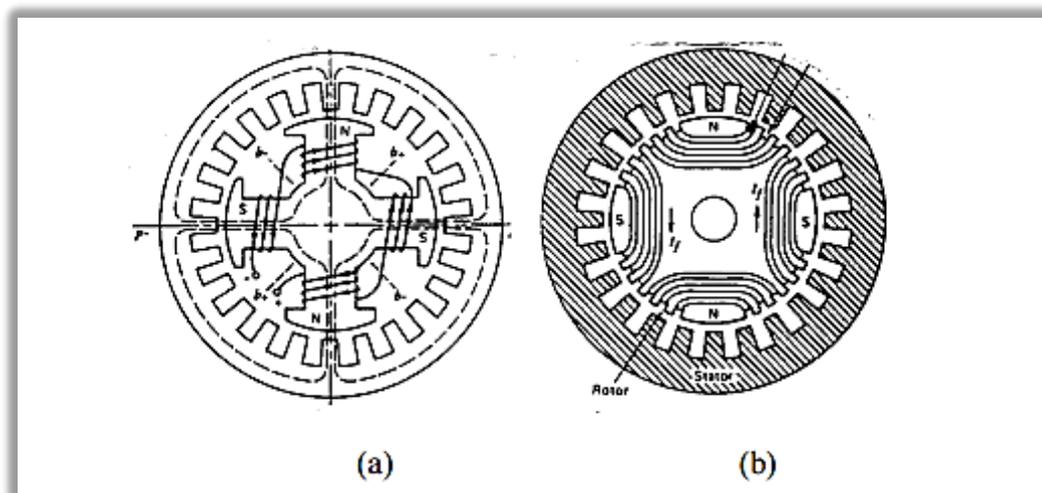


Figura 4 - Rotor de polos salientes (a), Rotor de polos lisos (b).
Fonte: VASCO, 2016.

Nos rotores de polos salientes há um núcleo central montado no meio, ao qual se ligam polos onde são enrolados os enrolamentos do indutor. Esta solução é utilizada normalmente em máquinas de elevado número de polos (baixa velocidade de rotação) sendo relativamente reduzida a força centrífuga a que os polos estão sujeitos.

Já nas máquinas de polos lisos os condutores estão montados em cavas e distribuídos ao longo da periferia. O número de polos é reduzido (velocidade elevada) sendo o diâmetro destas máquinas relativamente pequeno ($D < 1,10\text{m}$) (VASCO, 2016).

Apesar de, normalmente, esta máquina ter um comprimento bastante grande (5 a 6 m) o seu momento de inércia é muito menor do que o de uma máquina de polos salientes equivalente que é mais curta, mas tem um diâmetro muito maior (VASCO, 2016).

2.2. MÁQUINAS SÍNCRONAS FUNCIONANDO COMO MOTOR

Os motores síncronos possuem o estator e os enrolamentos de estator, também chamados de armadura, e são bastante semelhantes aos dos motores de indução trifásicos. Nos motores de indução, a circulação de corrente no enrolamento do estator produz um fluxo magnético girante, o qual progride em torno do entreferro. Com os motores síncronos, acontece da mesma maneira.

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente. Na Figura 5 está indicada a forma de onda de um sistema trifásico equilibrado constituído por três conjuntos de bobinas dispostas simetricamente no espaço formando um ângulo de 120° . A Figura 6 está representando o enrolamento de um motor trifásico. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes i_1 , i_2 e i_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1 , H_2 e H_3 . Estes campos são espaçados entre si de 120° . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° entre si. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H_1 , H_2 e H_3 naquele instante (WEG, 2016).

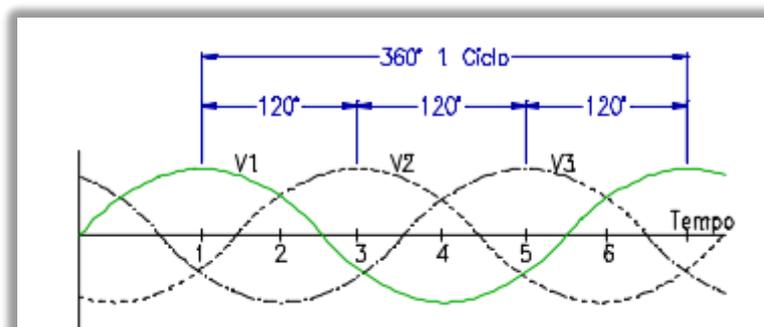


Figura 5 - Forma de onda de um sistema trifásico.
Fonte: WEG, 2016.

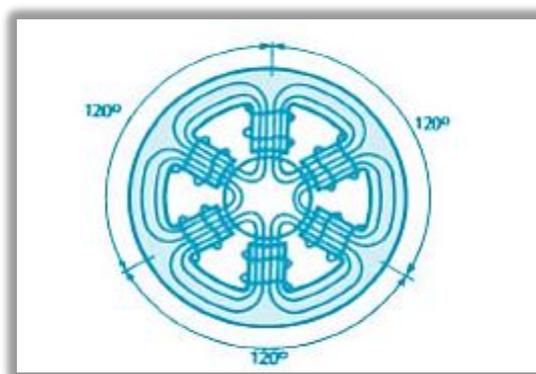


Figura 6 - Enrolamento motor trifásico.
Fonte: WEG, 2016.

Uma aplicação muito comum desse tipo de motor é em processos que demandam velocidade constante com carga variável e também pode ser utilizado para fornecer compensação de potência reativa na indústria.

Os motores síncronos são habitualmente mais caros do que os de indução, mas são principalmente competitivos quando se destinam a velocidades muito baixas (muitos polos), e/ou para potência elevadas. (BARBOSA, 2008).

2.2.1. Velocidade síncrona

A velocidade síncrona do motor (rpm) é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pares de polos (p) do motor e da frequência (f) da rede. Os enrolamentos do estator podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo (WEG, 2016).

Então, como o enrolamento possui polos ou então pares de polos, podemos calcular a velocidade do campo através da Equação 1:

$$\text{Velocidade} = 60.f/p \text{ [rpm]} \quad (1)$$

Quando o motor está em sua operação normal, os polos do rotor e o fluxo magnético do estator estão em perfeito sincronismo, pois não há nenhum movimento relativo entre eles, sendo assim não há indução de tensão elétrica no rotor pelo fluxo

mútuo e, portanto, não há excitação proveniente da alimentação de corrente alternada.

Todos os roteiros a serem realizados envolvem medições de rotação da máquina síncrona, portanto através de um medidor de rotação será feita a aquisição de dados de maneira remota e apresentado no supervisório.

2.2.2. Vantagens

Na grande maioria das vezes, a utilização de motores síncronos, resulta em vantagens econômicas e operacionais, além dessas vantagens o acoplamento com o sistema digital proposto trás maior confiabilidade da máquina, por supervisionar dados elétricos em tempo real. Dentre as principais vantagens econômicos e operacionais estão o seu alto rendimento e correção do fator de potência da rede.

- Rendimento

No processo de compra de um motor na indústria, além de considerarmos o custo inicial, deve-se também ser considerado os custos de operação e o seu rendimento. Um motor síncrono com fator de potencia (FP) = 1,0 é usualmente a solução. Pois, sendo a potência reativa (kVar) desnecessária, e aplicável somente a potência real (kW), a corrente de linha é minimizada, resultando em menor perda I^2R no enrolamento do estator. Uma vez que a corrente de campo requerida é a mínima praticável, haverá menor perda I^2R no enrolamento de campo da mesma forma (WEG, 2016).

Com exceção das situações onde um alto conjugado é requerido, a baixa perda nos enrolamentos do estator e de campo permite que o motor síncrono com FP=1.0 seja construído em tamanho inferior aos motores síncronos com FP= 0.8 de mesma potência. Assim, os rendimentos do motor síncrono com FP=1.0 são geralmente superiores aos do motor de indução de mesma potência (WEG, 2016).

Na Figura 7, temos um comparativo entre um motor síncrono com FP=1.0, um motor síncrono com FP=0.8 e um motor de indução.

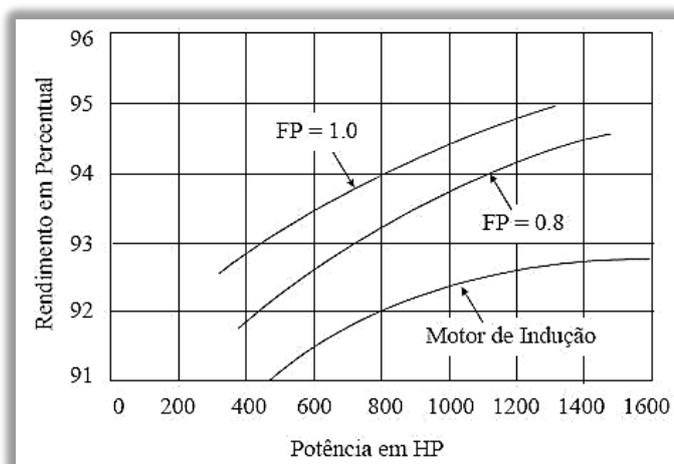


Figura 7 - Comparativo entre motores.
Fonte: WEG, 2016.

- Correção do fator de potência

Os sistemas de potência elétrica não possuem apenas potência ativa (kW), na indústria, geralmente predominam cargas reativas indutivas, que requerem uma considerável quantidade de potência reativa (kVar) consumida como corrente de magnetização. Para suprir a necessidade de potência reativa, normalmente são propostas duas soluções, uma delas é a utilização de banco de capacitores, e a outra é a utilização de motores síncronos.

O fator de potência dos motores síncronos pode ser facilmente controlado devido ao fato de possuírem uma fonte separada de excitação, e desta forma, podem tanto aumentar a potência sem geração de potência reativa (motor com fator de potência unitário), ou também gerar potência reativa necessária (motor com fator de potência 0.8). Desta forma, o motor síncrono, dependendo da aplicação, pode fornecer a potência útil de acionamento necessária com redução benéfica da potência total do sistema (WEG, 2016).

2.2.3. Tipos de Excitação

2.2.3.1. Excitatriz Estática (com escovas)

Motores Síncronos com excitatriz do tipo estática são constituídos de anéis coletores e escovas que possibilitam a alimentação de corrente dos polos do rotor

através de contato deslizante. A Corrente Contínua para alimentação dos polos deve ser proveniente de um conversor e controlador estático CA/CC. A excitatriz estática atualmente está sendo muito utilizada em aplicações com variação de velocidade através de Inversores de Frequência (WEG, 2016). A Figura 8 exemplifica como é constituído um motor de excitatriz estática.

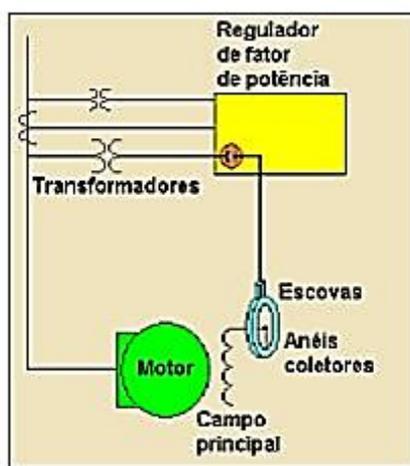


Figura 8 - Modelo de motor com excitatriz estática
Fonte: WEG, 2016.

2.2.3.2. Excitatriz *Brushless* (sem escovas)

Motores Síncronos com sistema de excitação *brushless* possuem uma excitatriz girante, normalmente localizada em um compartimento na parte traseira do motor.

Essa excitatriz funciona como um gerador de corrente alternada onde o rotor que fica localizado no eixo do motor possui um enrolamento trifásico e o estator é formado por polos alternados norte e sul alimentados por uma fonte de corrente contínua externa. O enrolamento trifásico do rotor é conectado a uma ponte de diodos retificadores. A tensão gerada no rotor é retificada e utilizada para a alimentação do enrolamento de campo do motor. A amplitude desta corrente de campo pode ser controlada através do retificador que alimenta o campo do estator da excitatriz (WEG, 2016).

O custo de manutenção de motores síncronos com excitação *brushless* é baixo, pois esse tipo de motor não possui escovas. Devido ao fato de não possuírem contatos elétricos deslizantes, conforme é possível observar no esquema da Figura

9, o risco de faiscamento é eliminado. Esse tipo de motor é fortemente recomendado para aplicações em ambientes com risco de explosões.

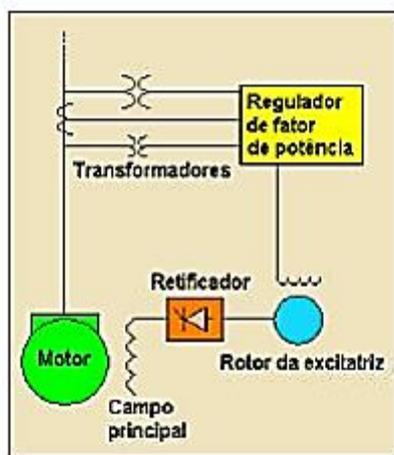


Figura 9 - Modelo de motor com excitatriz brushless
Fonte: WEG, 2016.

2.3. MÁQUINAS SÍNCRONAS FUNCIONANDO COMO GERADOR

Geradores síncronos são máquinas que são destinadas a transformar energia mecânica em energia elétrica, entre suas diversas aplicações, estão usinas hidrelétricas e usinas termelétricas.

Em usinas hidrelétricas são utilizados normalmente geradores de eixo vertical, com rotor de polos salientes e de grande diâmetro, grande número de polos e sua velocidade varia entre 100-360 rpm. Em usinas termelétricas são utilizados geradores de eixo horizontal com rotor cilíndrico e de pouco diâmetro, usualmente de 2 ou 4 polos e sua velocidade varia entre 1800-3600 rpm (LEÃO, 2016).

De acordo com a Equação 2, a velocidade síncrona do gerador é calculada da mesma maneira que em motores síncronos

$$\text{Velocidade} = 60.f/p \text{ [rpm]} \quad (2)$$

Como citado no item 2.1.1.1 será feita aquisição da velocidade para o supervisor pelo Arduino em conjunto com a instrumentação adequada.

2.3.1. Princípios de funcionamento

Quando um indutor cria um campo constante φ , e conseqüente gera uma velocidade constante Ω (rad/s) em um dos enrolamentos, uma tensão é verificada nos terminais de cada fase do induzido dada pela Equação 3, em que $\omega = p\Omega$ representa a velocidade do campo magnético em rad elétricos por segundo, p é o número de pares de pólos e N_i é o número de espiras por fase.

$$e = \omega.N_i.\varphi.f.\cos(\omega t) \text{ [V]} \quad (3)$$

O valor eficaz da tensão induzida será então $E = \omega N_i \varphi / \sqrt{2} = K \varphi f \omega$, sendo K um valor constante. A frequência da tensão induzida é dada por $f = \omega/2\pi$ ou $f = n_p/60$ se n for a velocidade do motor em rpm (BARBOSA, 2008).

A tensão é proporcional ao fluxo criado pelo indutor, mas a relação com a corrente de excitação é diferente devido à saturação.

2.3.2. Tipos de Excitação

Para o melhor desenvolvimento do roteiro que envolve curva de excitação, é necessário um conhecimento prévio dos tipos de excitação, já que no supervisório proposto as curvas serão apresentadas de forma gráfica.

2.3.1.1 Sistema de excitação estático

O sistema de excitação estático é constituído por um gerador síncrono controlado por um componente eletrônico, totalmente em estado sólido, denominado excitatriz estática. A excitatriz verifica a tensão de saída do gerador e alimenta o campo com CC, necessária para manter constante a tensão nos terminais para qualquer carga e fator de potência. No início do processo, ou escorvamento, o gerador é acionado na rotação nominal. As partes de ferro do gerador retêm certo nível de indução permanente, mesmo quando a corrente de excitação é nula. A tensão gerada, apenas por indução remanente, normalmente é superior a 5 V e suficiente para sensibilizar a excitatriz estática (BAGI, 2016).

2.3.1.2 Sistema de excitação *brushless*

No sistema "*brushless*" a potência para excitação do gerador é obtida através de um gerador trifásico de polos fixos e ponte retificadora rotativa. A tensão de saída do gerador permanece constante pelo controle de um componente em estado sólido, denominado "Regulador de Tensão". O regulador "verifica" a tensão de saída e alimenta o campo do excitador com a corrente necessária para gerar tensão CA, que após retificado por retificador rotativo, alimenta o campo do gerador (BAGI, 2016).

Segundo a fabricante de geradores BAGI as principais vantagens do sistema "*brushless*" sobre o sistema estático são:

- Não utiliza escovas e porta-escovas;
- Não introduz interferências geradas pelo mau contato;
- Introduz menor interferência devido ao chaveamento do tiristor do regulador comparado com o tiristor da excitatriz;
- Manutenção reduzida, solicitando cuidados apenas na lubrificação dos rolamentos;
- O sistema "*brushless*" admite com facilidade o controle manual;

E como desvantagens do sistema "*brushless*", a fabricante pontua:

- O sistema "*brushless*" possui resposta mais lenta que o sistema estático, devido ao campo do excitador. Assim sendo, para partida de motores de indução, normalmente a queda de tensão para geradores "*brushless*" é maior do que para geradores estáticos.
- A pesquisa de defeitos no sistema "*brushless*" é mais trabalhosa;
- O sistema "*brushless*" é cerca de 10% mais caro que o sistema estático.

3. AUTOMAÇÃO E SUPERVISÓRIOS

3.1. CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Devido à impossibilidade física de um ser humano verificar uma grande quantidade de dados num curto espaço de tempo num processo, a automação, que antigamente tinha a função apenas de produzir cópias de uma matriz pré-definida, hoje diferencia-se pela preocupação com a qualidade do que está sendo produzido (BOARETTO et.al., 2004).

O controle e a automação foram criados para facilitar as mais diversas atividades humanas e pode ser observada em locais como: nas residências em uma máquina de lavar roupa, em controladores de velocidade de veículos nas ruas e também em atividades comuns como bater o ponto em um registrador eletrônico no trabalho.

Automação é “qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitui o trabalho humano, em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, rapidez da produção ou da redução de custos, assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias, dos serviços ou bem estar” (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Pode-se dividir a automação em dois grandes grupos de controle, sendo eles o controle dinâmico e o controle lógico ou controle de eventos.

O controle dinâmico é aquele que utiliza valores lidos constantemente para em decorrer aperfeiçoar a precisão e a confiabilidade do sistema. Em plantas industriais é comum o uso do controle do tipo PID (proporcional + integral + derivativo).

O controle lógico complementa os sistemas lógicos permitindo que eles respondam a eventos externos ou internos respondendo geralmente a valores não lineares ou de lógica booleana. Apresenta-se na forma de circuitos (elétricos, hidráulicos, pneumáticos, etc). É característico da automação industrial de manufatura (automação discreta).

Além dessas divisões pode-se ainda classificar a automação segundo o grau de complexidade e meios de realização física, a automação industrial pode ser classificada em:

- Automações especializadas (menor complexidade);

- Grandes sistemas de automação (maior complexidade);
- Automações Industriais de âmbito local (média complexidade)

A automação especializada emprega microprocessadores com programação normalmente em linguagem de máquina e memórias do tipo ROM. Ex.: automação interna aos aparelhos eletrônicos, telefones, eletrodomésticos, automóveis (MARTINS, 2012).

Grandes sistemas de automação (maior complexidade) geralmente utilizam programação comercial e científica em software de tempo real. Ex.: Controladores de voos nos aeroportos, controle metroviário, sistemas militares (MARTINS, 2012).

Já as automações Industriais e de serviços de âmbito local (média complexidade) fazem uso de CLP's (controladores lógicos programáveis) isolados ou em redes. Ex.: Transportadores, processos químicos, térmicos, gerenciadores de energia e de edifícios. Corresponde à grande maioria das aplicações existentes (MARTINS, 2012).

A implementação do controle e automação será primordial no desenvolvimento do supervisor proposto, devido a se tratar de um modelo didático, irá ser feito o uso do ARDUINO, que será detalhada no 3.2.4, ao invés do CLP para executar o controle.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

A geração de energia exige alto nível de controle e supervisão do seu processo para evitar perdas, manter a segurança e confiabilidade. Para isso, é utilizado um grande número de instrumentos na implantação de plantas de energia. Dessa forma a instrumentação ou sensoriamento é parte fundamental em uma planta de controle.

No princípio da era industrial, o operário atingia os objetivos citados através de controle manual destas variáveis, utilizando somente instrumentos simples (manômetro, termômetro, válvulas manuais etc.), e isto era suficiente, por serem simples os processos.

Com o passar do tempo, estes processos de controle foram se tornando mais complexos, exigindo um aumento da monitoração nos processos industriais, através

dos instrumentos de medição e controle. Enquanto isso, os operadores deixavam de atuar física e diretamente no processo monitorado e ocorria a centralização das variáveis em uma única sala (GONÇALVES, 2003).

Dentre os sistemas de controles mais utilizados, temos o controle de malha fechada e o controle de malha aberta, ambos utilizam instrumentação em sua composição.

Para o controle de malha fechada temos um elemento final de controle atuando diretamente no processo, sendo que este processo é monitorado através de um instrumento específico. A medição executada por esse instrumento é utilizada para realimentação do sistema, como apresentado na Figura 10.

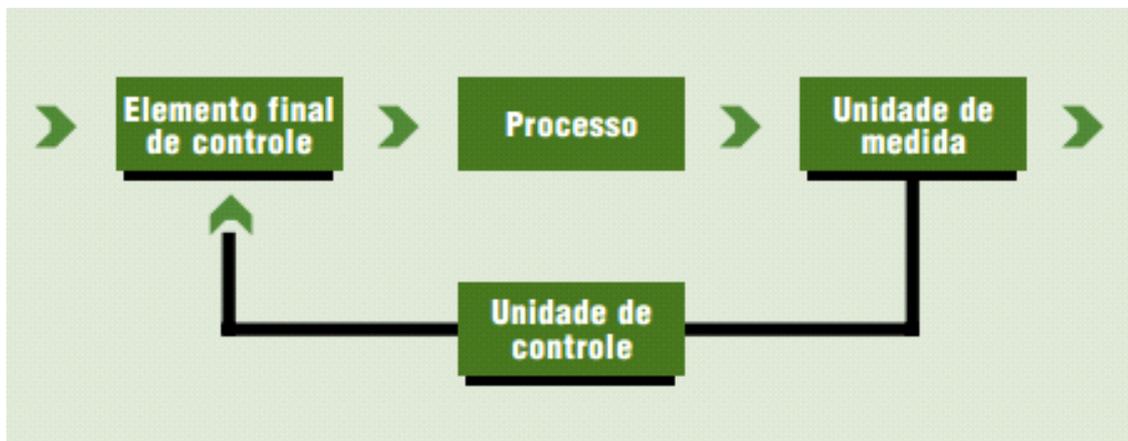


Figura 10 - Sistema de controle por malha fechada.
Fonte: GONÇALVES, 2003.

Para o controle de malha aberta a medição é também executada por um instrumento específico, porém o valor medido não é utilizado para realimentar o sistema é apenas informativo ao sistema de supervisão e controle, como é apresentado na Figura 11.

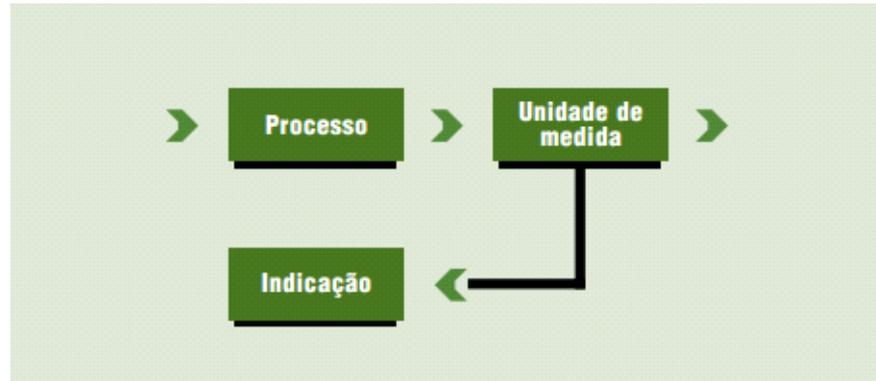


Figura 11 - Sistema de controle por malha aberta.

Fonte: GONÇALVES, 2003.

A terminologia utilizada nos instrumentos é unificada através da norma ISA 5.1 (*International Society of Automation*, antiga *Instrumentation Society of America*) de simbologia e terminologia de instrumentação e empregada entre fabricantes e usuários.

Dentre as terminologias utilizadas, pode-se destacar:

- Faixa de Medida ou Range: Conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro do limite superior e inferior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento (GONÇALVES, 2003).
- Alcance ou span: É a diferença algébrica entre o valor superior e o inferior da faixa de medida do instrumento (GONÇALVES, 2003).
- Erro: É a diferença entre o valor lido ou transmitido pelo instrumento em relação ao valor real da variável medida. Se tivermos o processo em regime permanente, chamaremos de erro estático, que poderá ser positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento, o qual poderá estar indicando a mais ou menos. Quando tivermos a variável alterando seu valor ao longo do tempo, teremos um atraso na transferência de energia do meio para o medidor. O valor medido estará geralmente atrasado em relação ao valor real da variável. Esta diferença entre o valor real e o valor medido é chamada de erro dinâmico (GONÇALVES, 2003).
- Exatidão: Podemos definir como a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro (GONÇALVES, 2003).

- Rangeabilidade ou largura de faixa: É a relação entre o valor máximo e o valor mínimo, lidos com a mesma exatidão na escala de um instrumento.
- Zona morta: É a máxima variação que a variável pode ter sem que provoque alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.
- Sensibilidade: É a mínima variação que a variável pode ter, provocando alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.
- Repetibilidade: É a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em porcentagem do span do instrumento. O termo repetibilidade não inclui a histerese.

Os itens 3.2.1 , 3.2.2 e 3.2.3 descrevem os principais instrumentos que serão utilizados no supervisor.

3.2.1. Voltímetro

O voltímetro é um instrumento comumente utilizado em plantas industriais sendo ele um instrumento que mede tensão em corrente contínua ou corrente alternada em uma escala geralmente graduada em volts, milivolts ou quilovolts. O modelo tipicamente usado comercialmente ou em laboratórios é o que possui um mecanismo eletromecânico no qual a passagem da corrente por espiras de fio é traduzida em uma tensão lida.

Outro tipo de voltímetro é o eletrostático, o qual usa a força eletrostática e é o único voltímetro que mede tensão diretamente em vez de pelo efeito da corrente. O potenciômetro opera comparando a tensão a ser medida com uma tensão conhecida; é usada para medir pequenas tensões.

O voltímetro eletrônico, que tem substituído o voltímetro de vácuo, usa amplificação e/ou retificação da medida em corrente contínua ou alterada. A corrente necessária para acionar o movimento não é feita no circuito sendo medido, esse tipo de instrumento não introduz erros na carga do circuito (*BRITANNICA ACADEMIC*, 2008). Um modelo de voltímetro é possível observar na Figura 12.

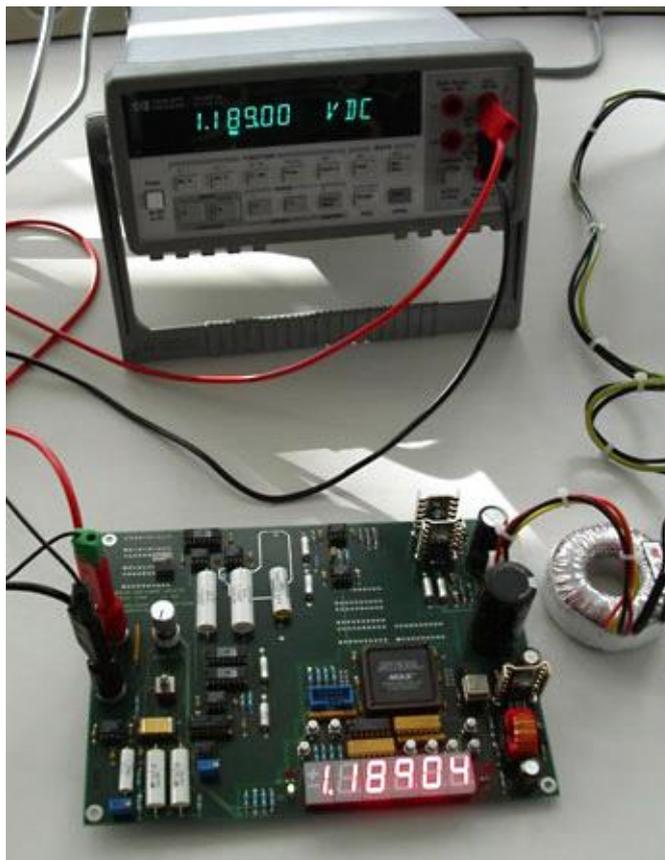


Figura 12 – Voltímetro.
Fonte: BRITANNICA ACADEMIC, 2008.

3.2.2. Amperímetro

Segundo a *BRITANNICA ACADEMIC* (2008) “O amperímetro é um instrumento para medição de corrente alternada ou contínua em amperes”. O amperímetro pode medir uma grande escala de valores, pois em altos valores apenas uma pequena parte é direcionada pelo mecanismo de medida devido a existência de um resistor shunt em paralelo com o medidor que carrega a maior parcela.

Amperímetros variam em seus princípios de funcionamento e precisão. O amperímetro D’Arsonval-movement mede diretamente a corrente com erros entre 0,1 a 2 por cento. O amperímetro eletrodinâmico usa uma bobina móvel rodando no campo produzido pela bobina fixa. Este mede corrente contínua e alternada com erro entre 0,1 e 0,25 por cento.

Já em um amperímetro térmico, usado principalmente na medida de corrente alternada, o erro está entre 0,5 a 3 por cento. a medida da corrente esquentam um termopar a pequena tensão gerada que é usada para alimentar um milivoltímetro.

Amperímetros digitais, sem partes moveis, usam um circuito tal como o integrador de dupla inclinação para converter uma corrente medida analogicamente para seu valor correspondente digital. Muitos amperímetros digitais tem sua precisão melhores que 0,1 por cento. Os componentes internos de um amperímetro de bobina móvel podem ser observados na Figura 13.

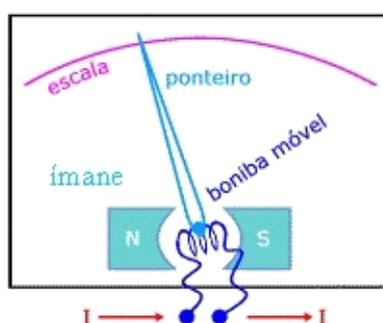


Figura 13 - Amperímetro
Fonte: FEUP, 2007.

3.2.3. Tacômetro

Os tacômetros são instrumentos que geralmente necessitam de acesso ao eixo motriz para contar-se o número de revoluções do eixo. Os métodos mais utilizados para realizar as medições nos aparelhos são:

- Contato: O equipamento possui um encoder, o qual é acoplado, mecanicamente ao eixo motriz.
- Óptico: O equipamento lança um feixe de laser no eixo motriz e conta o numero de reflexões de luz através de uma fita adesiva reflexiva fixada pelo usuário no eixo.
- Luz estroboscópica: fixa-se uma marca de referencia ao eixo motriz e varre-se a frequência de luz estroboscópica até que a marca de referencia pareça estacionaria, nesta condição a frequência de rotação é um múltiplo da frequência da fonte de luz.

3.2.4. Arduino

Para o controle de plantas industriais os CLP's são os mais utilizados, porém para pequenas aplicações como protótipos, automação residencial e aplicações que exigem pouca capacidade de *software*, uma plataforma que está em ascensão é o Arduino.

Arduino é uma plataforma eletrônica aberta de hardware e *software* e de fácil utilização. Com placas Arduino é possível ler entradas tais como luz em um sensor, um botão ou até mesmo uma mensagem de Twitter e transformar em uma saída, tal como ativação de um motor, ligar um LED ou publicar uma mensagem online.

É possível dizer à placa o que deve ser enviado, setando as instruções no microcontrolador da placa. Para fazer essas instruções é necessário utilizar a linguagem de programação do Arduino e o Arduino *software* IDE (ARDUINO CC, 2016).

A utilização do Arduino possui diversas vantagens segundo seus desenvolvedores:

- Baixo custo – Placas Arduino são relativamente baratas comparadas a outras plataformas de microcontroladores. A versão mais barata do modulo arduino pode ser montada a mão e até mesmo as versões pré montadas custam menos de 50 dólares.
- Multiplataforma – O *software* Arduino (IDE) roda em Winwos, Macintosh OXS e linux. A maioria dos controladores é limitada apenas a Windows.
- Programação simples e limpa – O Arduino *software* IDE é um *software* fácil de usar para iniciantes, e flexível o suficiente para usuários avançados terem vantagens também. Para professores, é conveniente, pois o ambiente de programação do Arduino é familiar a alunos que já tiveram algum contato com programação.
- *Software* extensível – O Arduino *software* é publicado como código aberto, disponível como extensão para programadores experientes. A linguagem pode ser expandida através de bibliotecas C++, e as pessoas que buscam entender detalhes técnicos podem fazer um salto do Arduino para a linguagem de programação AVR, na qual é baseado. Similarmente é possível adicionar código AVR-C diretamente em seu programa do Arduino.

- *Hardware* extensível – Os projetos das placas de Arduinos são publicados sobre uma licença “Creative Commons”, para os desenvolvedores de circuitos mais experientes podem fazer sua própria versão do módulo, aumentando ou melhorando. Até mesmo usuários menos experientes podem construir uma placa para entender como funciona e poupar dinheiro. Na Figura 14 é mostrado um dos modelos das placas Arduino, conhecida comercialmente como Arduino Uno.

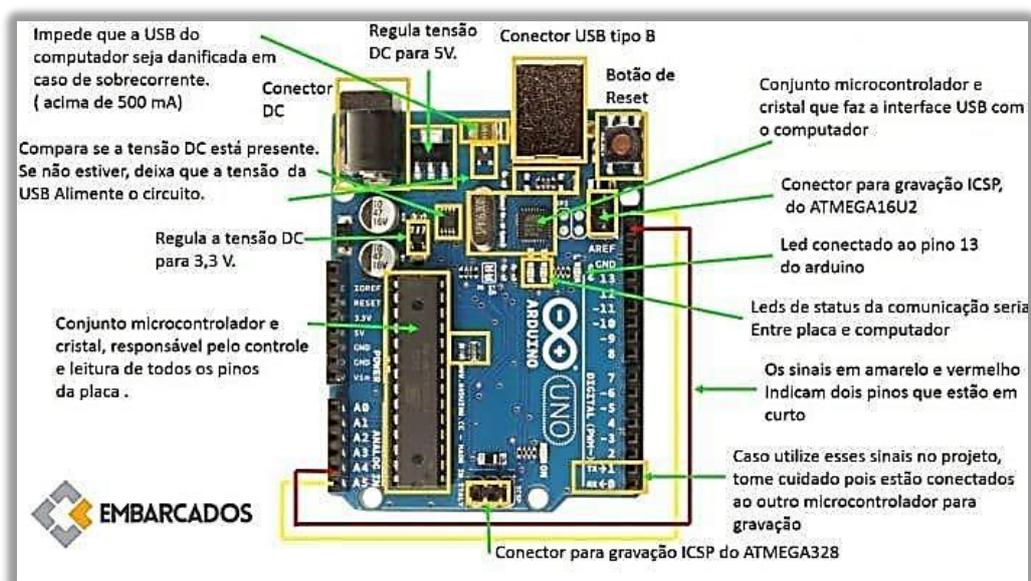


Figura 14 - Arduino Uno
 Fonte: ARDUINO CC, 2016.

A placa do Arduino pode ser alimentada pela conexão USB ou por uma fonte de alimentação externa. A placa conta com um circuito pra comutar a alimentação automaticamente entre a tensão da USB e a tensão da fonte externa. Caso haja uma tensão no conector DC e a USB é conectada, a tensão de 5 V será proveniente da fonte externa e USB servirá apenas para comunicação com o PC.

A placa possui 28 pinos, sendo que 23 desses podem ser utilizados como I/O e os demais para alimentação e referencia de terra. A Figura 15 exhibe a sua pinagem detalhada.

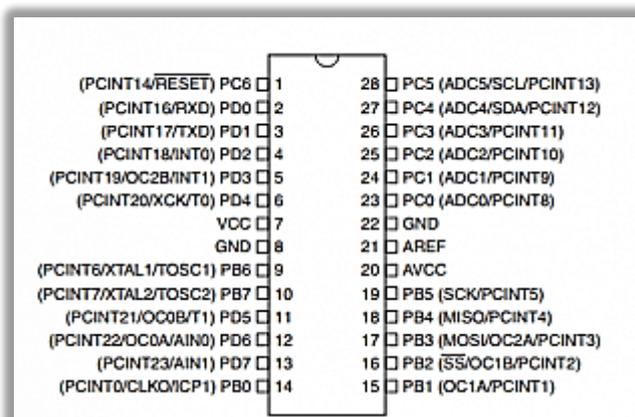


Figura 15 - Pinagem ATmega328 usado no Arduino UNO
 Fonte: Arduino CC, 2016.

A placa Arduino UNO possui pinos de entrada e saídas digitais, assim como pinos de entradas e saídas analógicas, a Figura 16 exibe a pinagem conhecida como o padrão Arduino.

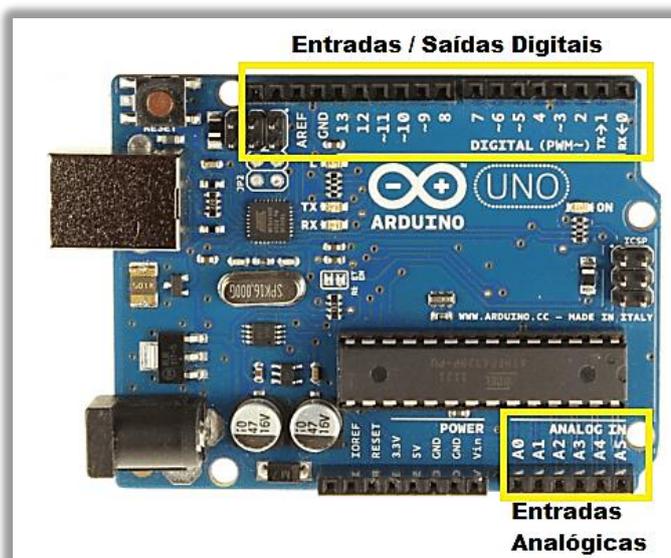


Figura 16 - Pinos de entrada e saída no Arduino UNO R3
 Fonte: ARDUINO CC, 2016.

Conforme exibido na Figura 16, a placa Arduino UNO possui 14 pinos que podem ser usados como entrada ou saída digitais. Estes Pinos operam em 5 V, onde cada pino pode fornecer ou receber uma corrente máxima de 40 mA. Cada pino possui resistor de pull-up interno que pode ser habilitado por software. Alguns desses pinos possuem funções especiais:

- PWM : 3,5,6,9,10 e 11 podem ser usados como saídas PWM de 8 bits através da função analogWrite();

- Comunicação serial: 0 e 1 podem ser utilizados para comunicação serial. Deve-se observar que estes pinos são ligados ao microcontrolador responsável pela comunicação USB com o PC;
- Interrupção externa: 2 e 3 . Estes pinos podem ser configurados para gera uma interrupção externa, através da função `attachInterrupt()`.

A placa Arduino UNO é programada através da comunicação serial, pois o microcontrolador vem programado com o bootloader. A comunicação é feita através do protocolo STK500.

A programação do microcontrolador também pode ser feita através do conector ICSP (*in - circuit serial programming*) utilizando um programador ATMEL.

3.3. SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é um *software* que permite monitorizar e controlar um processo, pelo acesso remoto a dados desse processo, que são compilados e posteriormente apresentados ao operador, permite ainda, através de ferramentas de comunicação específicas a cada caso, controlar o mesmo (MOREIRA, 2011).

Um dos primeiros sistemas de telemetria (medição de dados remotos) foi utilizado em sistemas ferroviários para controlar a aproximação de comboios de uma bifurcação e selecionar/controlar o caminho que estes deveriam seguir. As redes de comunicação destes sistemas eram cabladas e utilizavam switches eletrônicos junto das linhas que permitiam o envio de informações para uma estação central.

Estas informações eram visualizadas em sinais luminosos que indicavam a proximidade de um comboio e o estado da bifurcação, podendo assim os operados alterar o estado da bifurcação, se necessário. Foram sistemas de telemetria como estes que deram origem a sistemas SCADA. (MOREIRA, 2011). A Figura 17 ilustra um modelo de sistema supervisorio desenvolvido na ferramenta ELIPSE.

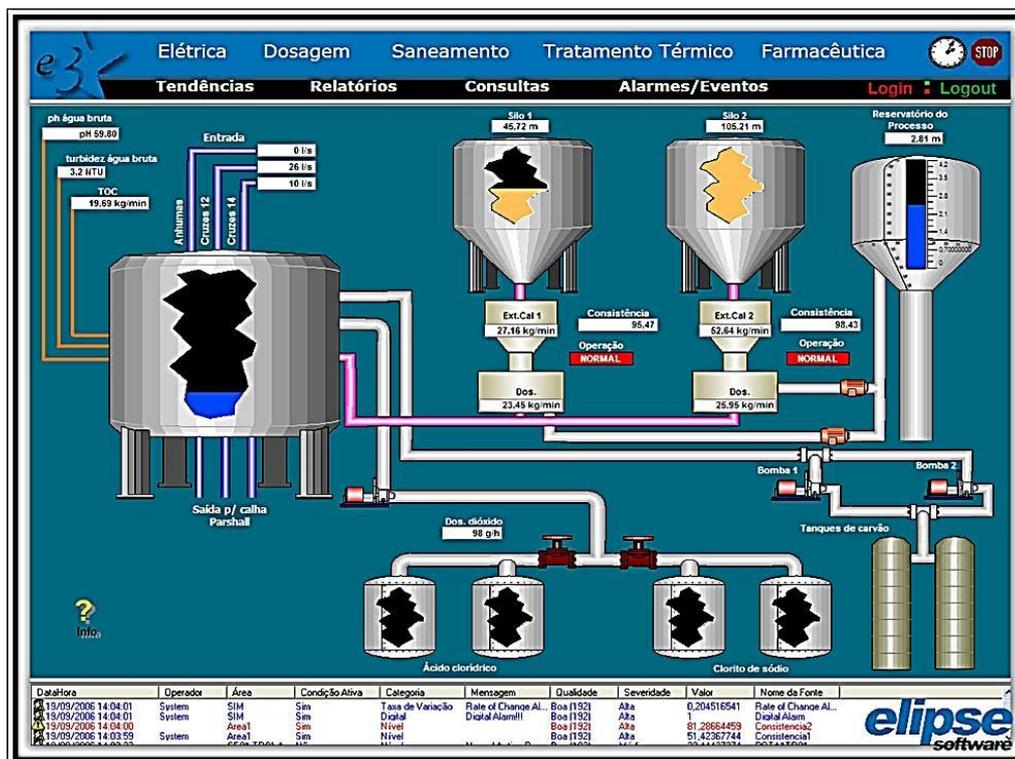


Figura 17– Tela desenvolvida em um SCADA
Fonte: ELIPSE SOFTWARE, 2016.

Segundo Penin (2007), um sistema SCADA deve se ater aos seguintes requisitos:

- Funcionar em qualquer computador *standard*, com sistema operativo Windows;
- Arquitetura aberta que permita a sua combinação com aplicações *standard*, possibilitando ao programador a criação de soluções de gestão e supervisão optimizadas;
- Instalação simples, sem grandes exigências em nível do *hardware*, fáceis de utilizar e com interfaces simples para o utilizador;
- Permitir a integração com ferramentas de gestão e produção;
- Fácil de reconfigurar, permitindo uma adaptação ou crescimento a mudanças na empresa;
- Ser independente do ramo de atividade e da tecnologia utilizada;
- Conter integradas funções de gestão e supervisão;

- Comunicações flexíveis e transparentes, que permitam que o operador comunique de forma simples com a equipe da fábrica e com a restante empresa, a partir de redes de locais e de gestão.

O *software* SCADA deve permitir que estratégias de controle possam ser desenvolvidas utilizando-se de funções avançadas, através de módulos dedicados para implementação de funções matemáticas e lógicas, por exemplo. Através destes módulos, poderão ser feitos no *software* aplicativo de supervisão, o controle das funções do processo (MARTINS, 2012).

Segundo Ogata (1993), o *software* supervisorio é visto como o conjunto de programas gerados e configurados no *software* básico de supervisão, implementando as estratégias de controle e supervisão com telas gráficas de interface homem-máquina que facilitam a visualização do contexto atual, a aquisição e tratamento de dados do processo e a gerência de relatório e alarmes. Este *software* deve ter entrada de dados manual, através de teclado.

Os dados serão requisitados através de telas com campos pré-formatados que o operador deverá preencher. Estes dados deverão ser autoexplicativos e possuírem limites para as faixas válidas. A entrada dos dados deve ser realizada por telas individuais, sequencialmente, com seleção automática da próxima entrada.

Após todos os dados de um grupo serem inseridos, esses poderão ser alterados ou adicionados pelo operador, que será o responsável pela validação das alterações. Segundo Martins (2012) os componentes físicos de um sistema de controle e supervisão podem ser resumidos, de forma simplificada, em:

- Sensores e atuadores
- Rede de comunicação
- Estações remotas
- Estações de monitoração central.
- Sensores e atuadores.

Os sensores são dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA, que convertem parâmetros físicos tais como velocidade, nível de água e temperatura, para sinais analógicos e digitais legíveis

pela estação remota. Os atuadores são utilizados para atuar sobre o sistema, ligando e desligando determinados equipamentos (MARTINS, 2012).

O processo de controle e aquisição de dados se inicia nas estações remotas, PLCs (*Programmable Logic Controllers*) e RTUs (*Remote Terminal Units*), com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que a ele estão associados e seu respectivo controle.

Os PLCs e RTUs são unidades computacionais específicas, utilizadas nas instalações fabris (ou qualquer outro tipo de instalação que se deseje monitorar) para a funcionalidade de ler entradas, realizar cálculos ou controles, e atualizar saídas. A diferença entre os PLCs e as RTUs é que os primeiros possuem mais flexibilidade na linguagem de programação e controle de entradas e saídas, enquanto as RTUs possuem uma arquitetura mais distribuída entre sua unidade de processamento central e os cartões de entradas e saídas, com maior precisão e sequenciamento de eventos (MARTINS, 2012).

Uma rede de comunicação é a plataforma por onde as informações fluem dos PLCs/RTUs para o sistema SCADA e, levando em consideração os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas dial-up, linhas dedicadas, rádio modems, entre outros (MARTINS, 2012).

As unidades principais dos sistemas SCADA responsáveis por recolher a informação gerada pelas estações remotas e agir em conformidade com os eventos detectados, são conhecidas como estações de monitoração central, podendo ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores, de modo a permitir o compartilhamento das informações coletadas (MARTINS, 2012).

Além dos componentes físicos do sistema, também se pode destacar os componentes lógicos que segundo Martins (2012) são:

- Núcleo de processamento;
- Comunicação com PLCs/RTUs;
- Gerenciamento de Alarmes;
- Históricos e Banco de Dados;
- Lógicas de programação interna (Scripts) ou controle;
- Interface gráfica;

- Relatórios;
- Comunicação com outras estações SCADA;
- Comunicação com Sistemas Externos / Corporativos;

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto consiste na aplicação de um sistema de supervisão, utilizado usualmente em ambientes industriais, mas nesse caso voltado ao monitoramento de variáveis de uma máquina elétrica existente no laboratório.

A Figura 18 apresenta os principais componentes do projeto. Para o processamento dos dados foi utilizado como controlador um Arduino Uno R3 cujo processador é um ATMEGA328 no qual foram conectados sensores de tensão, rotação e corrente. O sistema de supervisão foi desenvolvido no software ELIPSE E3 em conjunto com um banco de dados Microsoft Acess 2017.

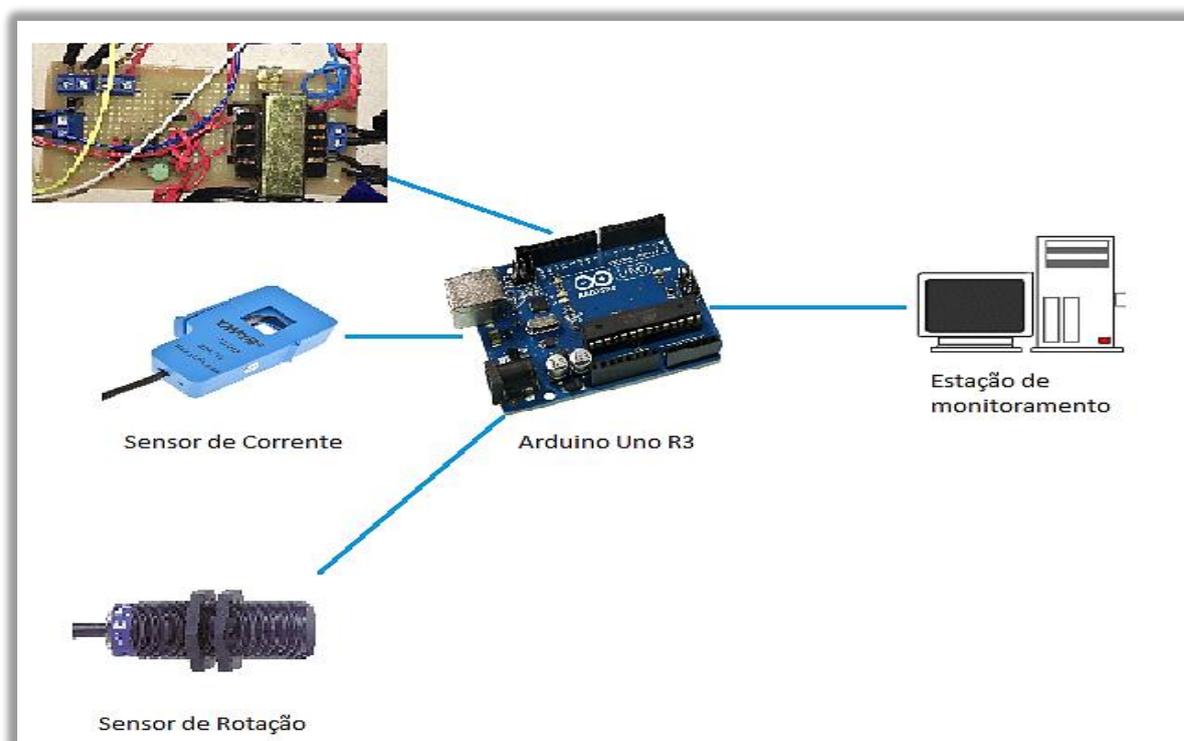


Figura 18 - Componentes do projeto

Fonte: Autoria própria, 2017.

A troca de informações entre o controlador e o ELIPSE E3 foi feita através do protocolo Modbus Serial.

4.1. FUNCIONAMENTO BÁSICO

Para que o sistema funcione corretamente todos os sensores devem estar devidamente posicionados na planta. Inicialmente é necessário conectar os cabos de medição de tensão aos terminais vermelho e preto, conforme a Figura 19.

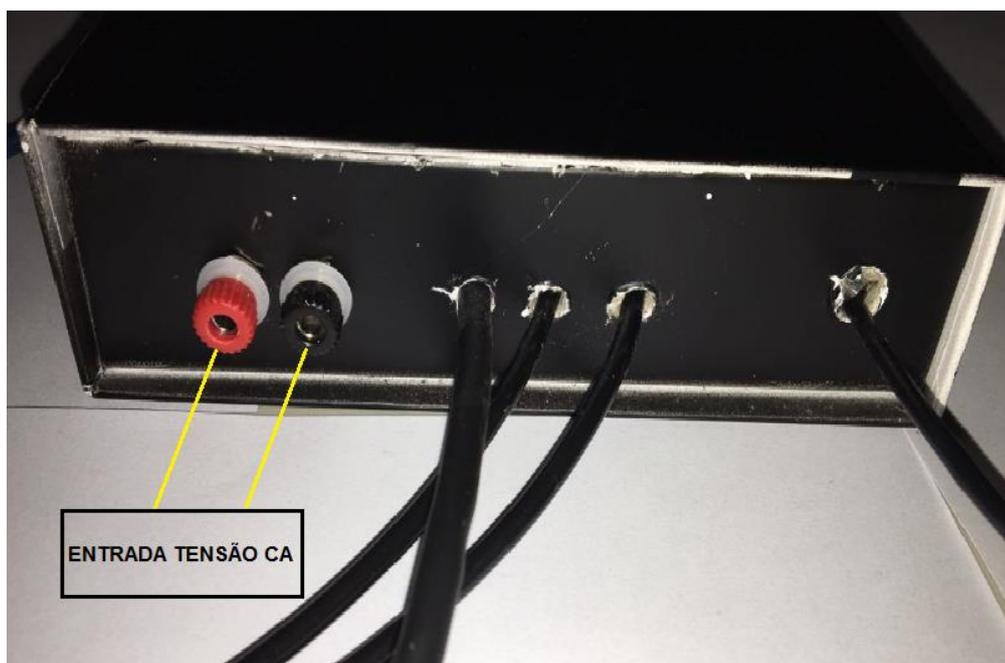


Figura 19 - Entrada de tensão do protótipo.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Os sensores de rotação e corrente estão acoplados diretamente ao controlador e apenas devem ser fixados corretamente ao rotor da máquina e ao circuito que será feita a medição de corrente conforme apresentado nas Figuras 20 e 21.

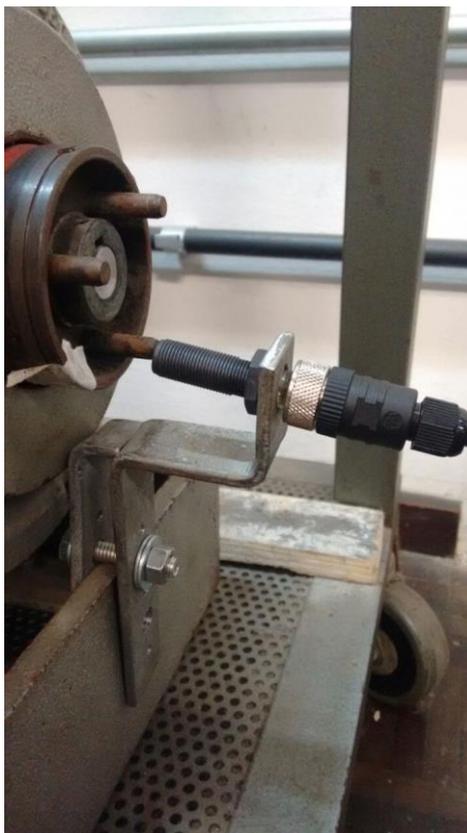


Figura 20 - Fixação sensor de rotação.
Fonte: Autoria própria, 2017.



Figura 21 - Fixação sensor de corrente.
Fonte: Autoria própria, 2017.

O sistema quando devidamente conectado irá funcionar resumidamente como demonstrado no fluxograma da Figura 22.

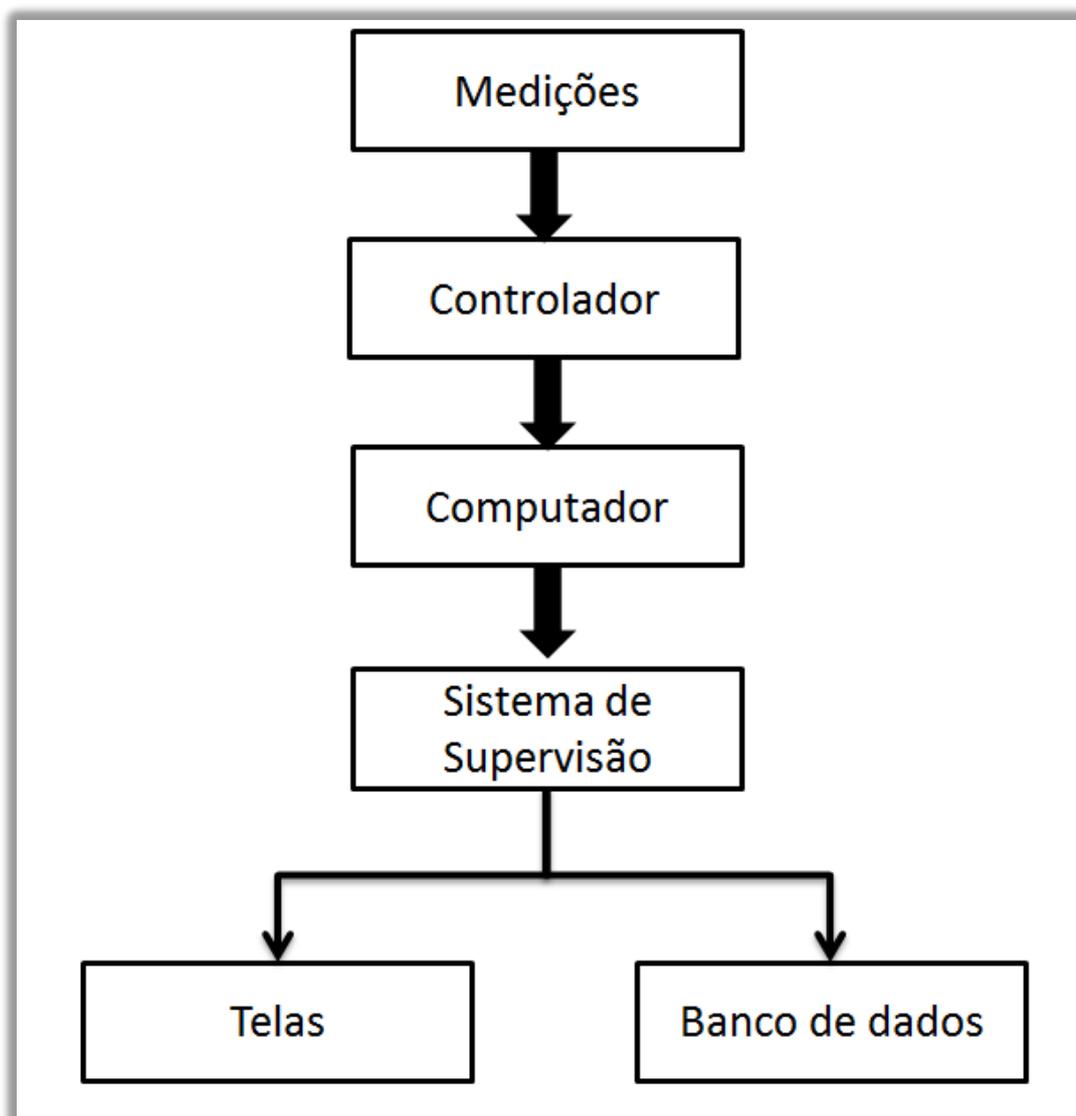


Figura 22 - Fluxograma de funcionamento.
Fonte: Autoria própria, 2017.

O controlador deve ser conectado a uma máquina que possua a aplicação instalada através do cabo USB e a fonte de alimentação do sistema em uma fonte que forneça alimentação 127 CA. Após a aplicação ser iniciada Elipse E3 Viewer os dados já poderão ser visualizados em tempo real através da tela do supervísório. Além disso, o supervísório foi configurado para armazenar os dados em um banco de dados para consultas posteriores, além de registrar alarmes de condições anormais do sistema.

4.2. COMPONENTES DO SISTEMA

O sistema de supervisão proposto foi composto por um controlador, um *software* para desenvolvimento de telas de supervisório, um sensor de tensão, um sensor de corrente, um sensor de rotação e uma base de dados.

4.2.1. Controlador

O controlador utilizado foi o Arduino Uno, pois atendia os requisitos da aplicação de maneira satisfatória. O arduino Uno é um microcontrolador baseado em um processador ATMEGA328P. Ele possui 14 pinos de entradas/saídas digitais (sendo 6 podendo ser usadas como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um crystal de quartzo de 16MHz, uma conexão USB, um leitor ICSP e um botão para reiniciar o controlador. A placa do controlador pode ser observada na Figura 23.

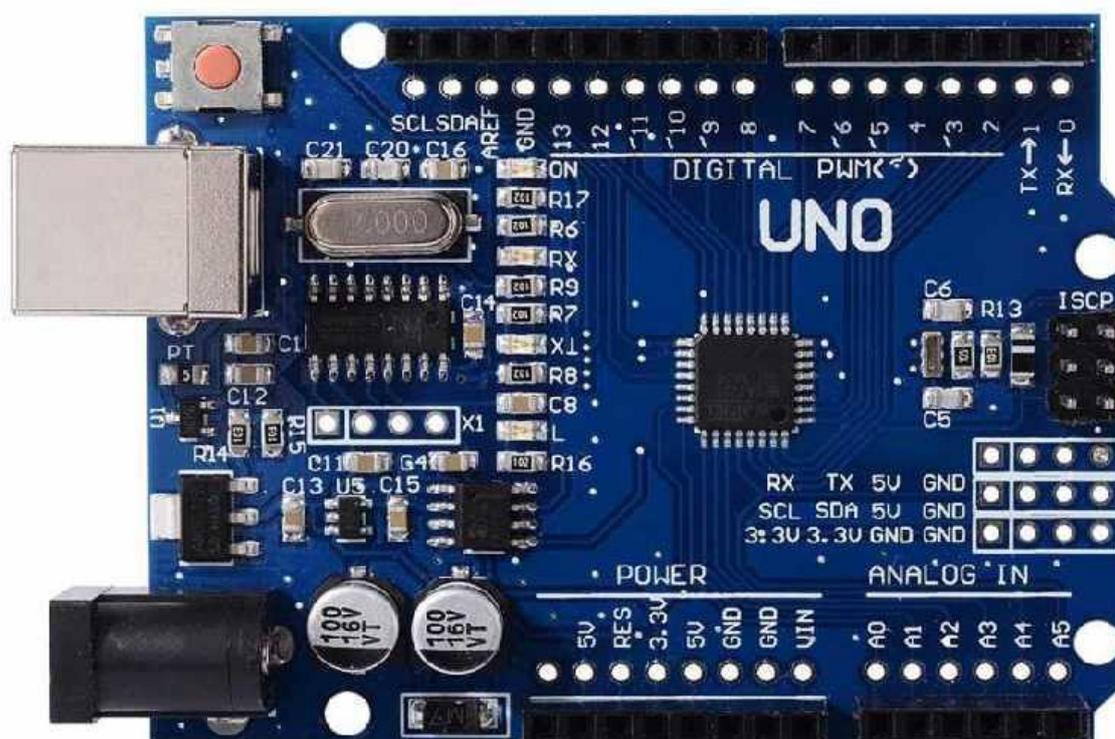


Figura 23 - Arduino Uno R3.
Fonte: Autoria própria, 2017.

A comunicação do controlador com o sistema supervisório foi feita através da porta USB presente no controlador que também é utilizada como fonte de alimentação para a placa. Devido a porta USB do Arduino simular uma porta serial é

possível utilizar um protocolo como o ModBus serial que para funcionamento correto foi implementado o código conforme a figura 24.

```
#include <modbus.h>
#include <modbusDevice.h>
#include <modbusRegBank.h>
#include <modbusSlave.h>
//Configura os registros do Banco de dados.
//Todos os registros acumulados serão acumulados nesse banco de registros.
modbusDevice regBank;
//Cria o modbus escravo.
modbusSlave slave;
//Configura o escravo com ID 1.
  regBank.setId(1);
/*
Os registros modbus são feitos da seguinte forma:
40001-49999 Analog Outputs, O dispositivo mestre pode ler e escrever nesses registros.
*/
//Adiciona os registros das saídas analógicas no banco.
  regBank.add(40001);
  regBank.add(40002);
  regBank.add(40003);
  regBank.add(40004);
  regBank.add(40005);
  regBank.add(40006);
  regBank.add(40007);
  regBank.add(40008);
//Determina que o escravo deve ler os registros que consta nesse banco
  slave._device = &regBank;
// Inicia a porta serial com velocidade de 9600
  slave.setBaud(9600);
  Serial.begin(9600);
void loop()
{
  slave.run();
}
```

Figura 24 - Código comunicação ModbuSerial.
Fonte: Autoria própria, 2017.

A interface de programação utilizada para todo o sistema é a Arduino IDE que é um *software* disponibilizado gratuitamente pelos desenvolvedores do produto.

4.2.2. *Software* de supervisão

O *software* de supervisão utilizado foi o ELIPSE E3, por possuir uma versão gratuita que, apesar das limitações, é de fácil acesso para os usuários em geral. Segundo o site da fabricante, as limitações da versão DEMO são as seguintes:

- Não é possível salvar projetos com mais de 20 tags de comunicação.
- Não é possível trabalhar com hot-standby.
- Não é possível trabalhar com domínios remotos.
- Em modo Runtime, a comunicação é permitida somente com um driver de nível 0 (zero), sem limites de tags. Drivers com nível maior do que 0 (zero) não são permitidos (Em modo Studio não há restrições).
- Não há acesso às configurações de domínio (Menu do E3Admin, Domínio--Opções).
- Somente a primeira imagem de cada categoria da galeria de símbolos está disponível.
- Não serão salvos projetos com mais de 20 tags.
- Permite abrir apenas 1 Viewer (ou WebViewer).
- O tempo máximo de execução do domínio é de 2 horas.

A versão utilizada foi a versão studio, essa versão possui um ambiente moderno e amigável, incluindo desde a configuração da comunicação até editores de scripts e de gráficos para a criação das telas de operação. Permite que um mesmo aplicativo seja editado por diversos usuários simultaneamente, facilitando o trabalho em equipe.

A interface de operação com o usuário é chamada de E3 Viewer, ela permite visualizar e operar em qualquer computador, a aplicação que está no servidor, podendo ser executado tanto na intranet quanto na internet, via browser. Não é necessária a instalação do aplicativo (projeto) na máquina cliente, pois todos os componentes, telas e bibliotecas são baixados do servidor e registrados ou atualizados automaticamente.

As telas desenvolvidas para o sistema de supervisão foram a tela de login, tela inicial, tela de alarmes e tela de gráficos.

4.2.2.1 Tela inicial

Na figura 25 é possível acompanhar a tela inicial do supervisor desenvolvido com alguns valores fictícios apenas para visualização de maneira completa.

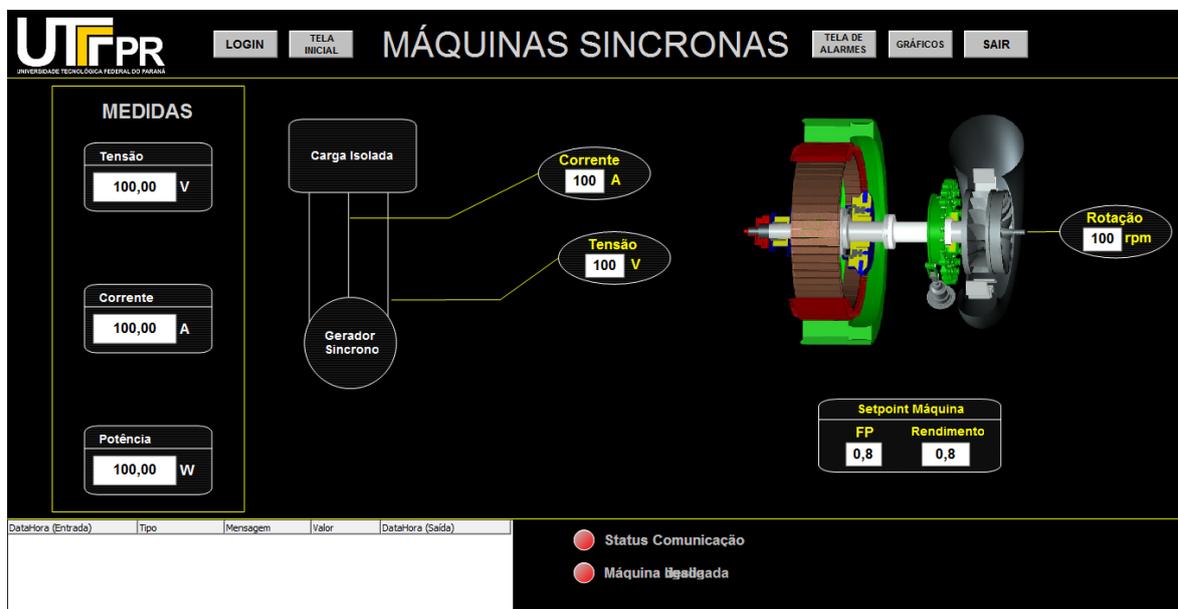


Figura 25 - Tela inicial do supervisor desenvolvido.

Fonte: Autoria própria, 2017.

No canto esquerdo da tela inicial estão sendo apresentadas as medidas de tensão e corrente em tempo real, e instantaneamente é calculada a potência que está sendo gerada. No centro da tela está sendo apresentada uma representação ilustrativa de uma máquina síncrona, e, além disso, são apresentados os valores de tensão, corrente e de rotação, que é o diferencial da coluna que está à esquerda da tela, também na mesma região é apresentado um setpoint aonde é possível inserir valores de fator de potência e rendimento específicos da máquina que está sendo supervisionada para obter valores coerentes de potência.

Na parte superior da tela, é possível alterar entre as telas de trabalho, podendo escolher entre a tela de login, alarmes, gráficos ou também sair da aplicação.

Na parte inferior da tela, no canto esquerdo são sinalizados os últimos alarmes, sendo detalhada a hora, o tipo de ocorrência, uma mensagem sobre o evento e o valor, para visualização do histórico detalhado de eventos deve-se acessar a tela de alarmes do supervisor. No canto direito é possível acompanhar o

status de comunicação da máquina e também o indicador de “máquina ligada” ou “máquina desligada”.

4.2.2.2 Tela de gráficos

Na Figura 26 é possível visualizar a tela de Gráficos do supervisório desenvolvido. No campo gráfico do lado esquerdo é possível ver como se comporta a tensão ao longo do tempo, no eixo 'X' cada quadrante representa uma variação de 5 segundos e no eixo 'Y' é possível acompanhar a variação da tensão e cada quadrante representa 50 V, no campo gráfico do lado direito é possível acompanhar como a rotação se comporta ao longo do tempo, no eixo 'X' é representado a linha do tempo com uma variação de 5 segundos por quadrante, e no eixo 'Y' é possível acompanhar a variação da rotação, sendo que cada quadrante representa 500 rpm.



Figura 26 - Tela de gráficos do supervisório desenvolvido.

Fonte: Autoria própria, 2017.

Na parte superior da tela, é possível alterar entre as telas de trabalho, podendo escolher entre a tela de login, tela inicial, alarmes, ou também sair da aplicação.

Na parte inferior esquerda, assim como na tela inicial, é possível acompanhar um pequeno histórico de alarmes recentes, e na parte inferior direita da tela é possível visualizar os valores das medições que está na tela inicial, assim, não é

necessário fazer troca entre as telas apenas para acompanhar os valores de tensão, corrente e potência.

4.2.2.3 Tela de Login

Na Figura 27 é apresentada a tela de login do supervisor desenvolvido, sendo possível a alteração entre usuários, ou no caso de não ter nenhum usuário cadastrado, basta clicar no botão “ENTRAR” para ter acesso à aplicação completa.



Figura 27 - Tela de Login do supervisor desenvolvido.

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2.4 Tela de Alarmes

Na Figura 28 é apresentada a tela de histórico de alarmes do supervisor desenvolvido, nessa tela é possível acompanhar um histórico com alarmes mais antigos e com eventos mais detalhados do que os apresentados na tela inicial ou então na tela de gráficos. É possível acompanhar a hora e data de cada evento que foi sinalizado como um alarme, o tipo de evento, valor, mensagem sobre e também data e hora que o evento foi finalizado, sendo este último campo um dos diferenciais em relação ao campo de alarmes encontrados em outras telas desse supervisor.

Dentro da tela de histórico de alarmes é possível fazer reconhecimento dos alarmes que é uma operação comum dentro do ambiente industrial que indica que o operador está ciente do alarme.

Na parte superior da tela, é possível alterar entre as telas de trabalho, podendo escolher entre a tela de login, tela inicial, gráficos, ou também sair da aplicação.

Na parte inferior da tela é possível acompanhar valores de tensão, corrente e potência, esses valores são apresentados na tela inicial e também na tela de gráficos, porém, é importante a presença dos mesmos na tela de alarmes, pois assim é possível acompanhar a variação deles enquanto se analisa algum evento, também na parte inferior da tela é possível acompanhar o status de comunicação da máquina, se está ligada ou não.

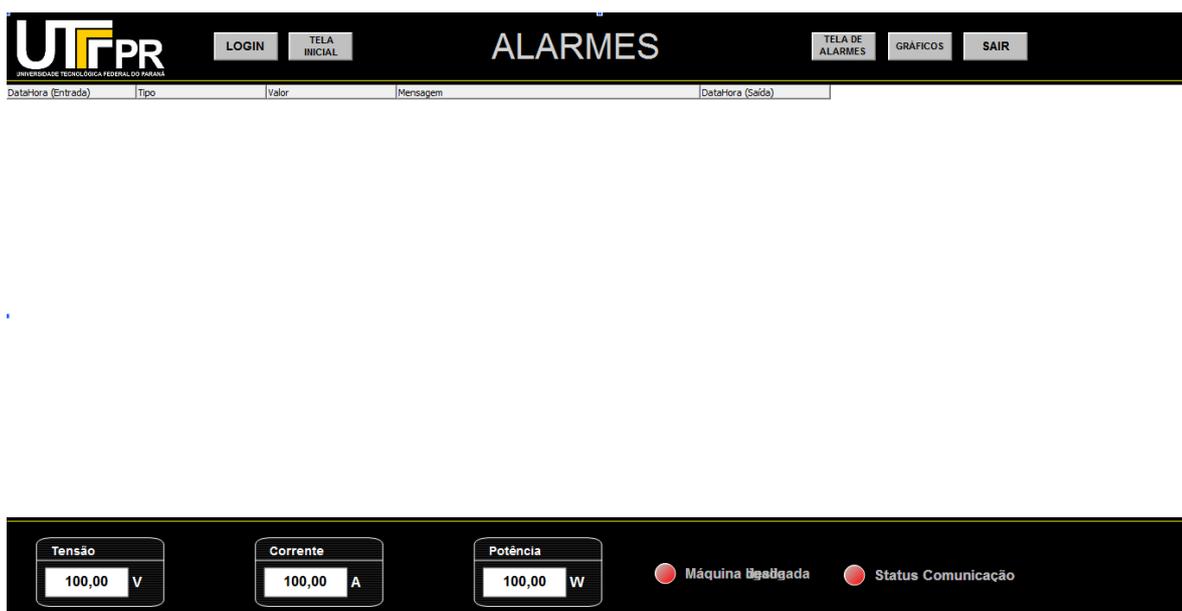


Figura 28 - Tela de alarmes do supervisor desenvolvido.

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.3. Sensor de tensão

O sensor de tensão anteriormente escolhido para a aplicação era o P8 da GBK robotics, conforme é apresentado no site do fabricante o sensor de tensão AC P8, apresentado na Figura 29, é um módulo eletrônico desenvolvido capaz de detectar tensões AC 127 V/220 V por meio de suas conexões, informando aos sistemas microcontroladores em que estiver instalado, entre eles, o Arduino, se há ou não a existência de tensão. O sensor também é descrito como muito eficiente,

portanto o Sensor de Tensão P8 também pode ser utilizado como voltímetro (medidor de tensão AC) em projetos eletrônicos, de forma a monitorar a tensão de entrada.



Figura 29 - Sensor de tensão GBK P8.
Fonte: GBK Robotics, 2017.

Após diversos testes em laboratório foi constatado que o sensor possui um comportamento não linear representado pela curva da Figura 30.

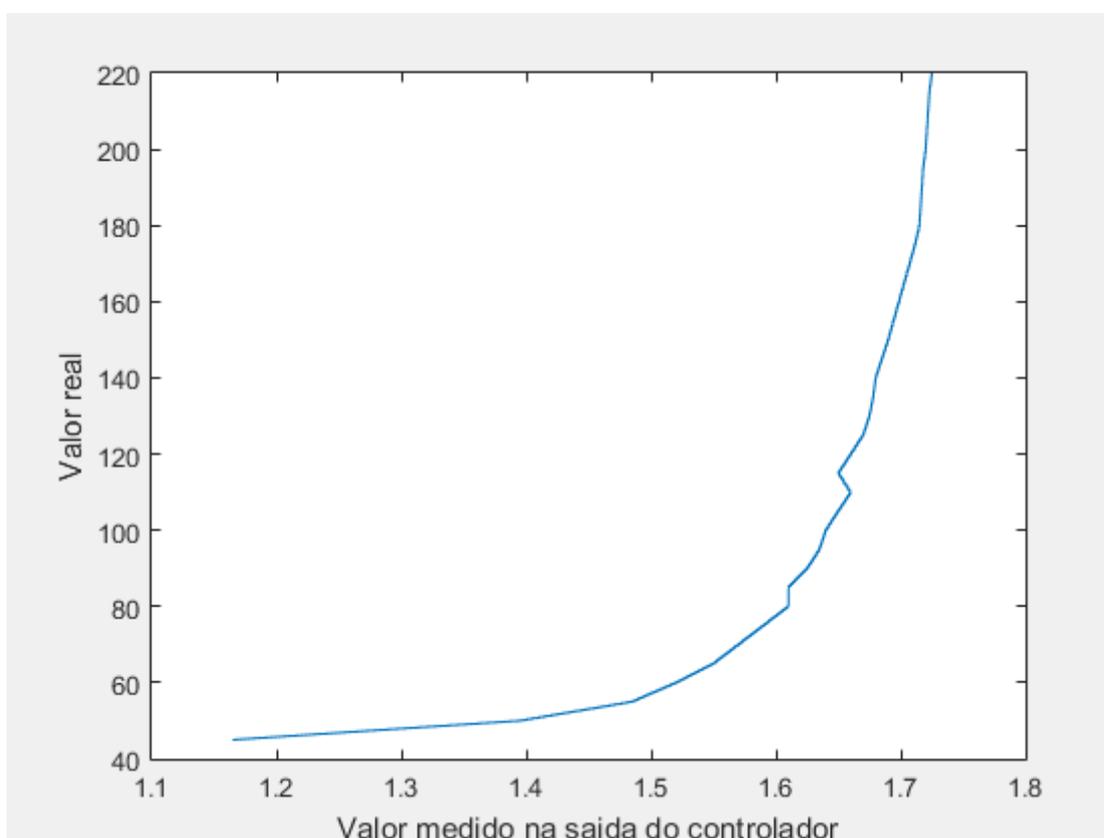


Figura 30 - Curva medição sensor P8.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Dessa forma a utilização desse sensor para fins de medição de tensão com uma precisão aceitável tornou-se inviável. Como forma alternativa de medição de tensão foi construído um sensor utilizando um transformador de tensão, uma ponte de diodos, resistores e capacitores. Assim a medição se tornou aproximadamente linear com resultados muito próximos de multímetros convencionais.

O sensor desenvolvido para a aplicação é um sensor de tensão construído de forma que ao receber um tensão em AC na faixa de 20~300 V, gerasse em sua saída uma tensão CC de no máximo 5 V (limite suportável da entrada analógica do controlador). O circuito elaborado para realizar as medições de tensão é composto de um transformador abaixador de potência de 220V para 20V, uma ponte retificadora que transforma o sinal do transformador de corrente alternada para corrente contínua com o auxílio de um capacitor e por fim um divisor resistivo que limita a tensão de saída a no máximo 5V. O circuito pode ser visualizado na Figura 31.

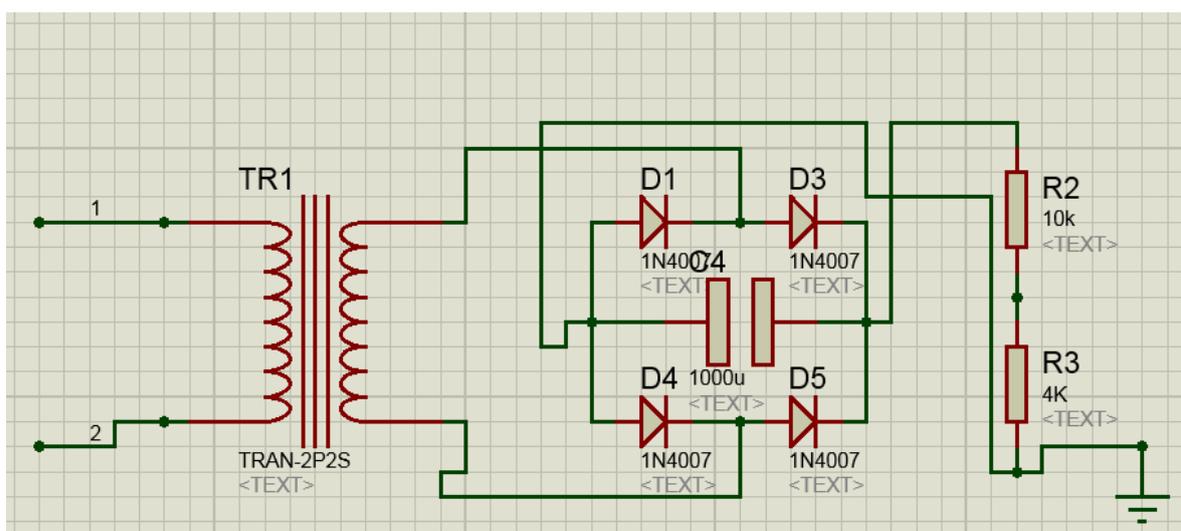


Figura 31 - Circuito do sensor de tensão.
Fonte: Autoria própria, 2017.

A calibração do sensor foi feita por meio de uma sequência de medições efetuadas de forma paralela com um multímetro convencional. Para funcionamento correto do sensor foi necessário a implementação do código no controlador conforme Figura 32.

```

float acum = 0;
int analog1 = 0;
float v1 = 0;
float tensao1;

void loop()
{
    //MEDIDOR DE TENSÃO
    analog1 = analogRead(0); //Le o valor de tensão 1 na entrada analógica 1.
    analog2 = analogRead(2); //Le o valor de tensão 2 na entrada analógica 2.
    //delay(1);
    v1 = (5.00 * analog1)/1024.00; //Transforma o valor lido na porta analógica para um valor em Volts(0-5V).
    v2 = (5.00 * analog2)/1024.00; //Transforma o valor lido na porta analógica para um valor em Volts(0-5V).
    //Sensibilidade do sensor inicia a partir do valor de v1>0.04
    if(v1>0.04){
        acum += 67*v1 + 17;
    }
    if(v1<0.04){
        acum += 0;
    }
    loops++;

    if (loops >4){
        loops = 0;
        float tensao1 = acum;
    }
    acum = 0;
}

```

Figura 32 - Código sensor de tensão.
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.4. Sensor de corrente

O sensor de corrente utilizado foi SCT-013-20 A que executa medições para correntes de entrada de 0 a 20 A gerando um sinal de saída de 0 a 1 V. O material do core do sensor é Ferrite, possui um dielétrico com capacidade de 6000 V AC/1min e opera em temperaturas de -25°C a +70°C, possuindo um cabo de 150 cm para ligações externas. O sensor foi conectado diretamente com seu condutor vermelho na alimentação de 3.3 V disponibilizada na placa do controlador e o condutor branco na porta analógica 1 da placa. A forma como foi fixado o sensor no Arduino pode ser visualizado na Figura 33.



Figura 33 - Fixação sensor de corrente.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Para correto funcionamento do sensor de corrente fez-se necessário a implementação de um código que fizesse com que o controlador efetuasse leituras de uma entrada CA, sendo que geralmente é necessário uma entrada CC para correta compreensão dos valores. Diversas possíveis soluções foram testadas, porém sem sucesso devido a amplitude do sinal ser muito baixa 0-1 V a retificação do sinal, mesmo com a utilização de amplificadores operacionais se mostrou ineficiente. As leituras apenas se tornaram confiáveis com a implementação de um código no controlador conforme a Figura 34.

```

int sensorValue_aux = 0;
float Corrente = 0;
float sensorMax = 0;
float TimeAtual, sensorValue, currentValue;
unsigned int counter=0;
unsigned int rotacao=0;
float voltsporUnidade = 0.004887586;// 5%1023

void loop()
{

//MEDIDOR DE CORRENTE
TimeAtual = millis();
sensorMax = 0;
while ((millis() - TimeAtual) < 100)
{
for(int i=100; i>0; i--){
sensorValue_aux = (analogRead(1)); // le o sensor na pino analogico A0 e ajusta
//o valor lido ja que a saida do sensor é (1023)vcc/2 para corrente =0
sensorValue += pow(sensorValue_aux,2); // somam os quadrados das leituras.
}

sensorValue = (sqrt(sensorValue/ 100)) * voltsporUnidade; // finaliza o calculo da média
//quadratica e ajusta o valor lido para volts

if(CurrentValue<0.171){
sensorMax = 0;
}
if(CurrentValue>0.171){
currentValue = (25.429*sensorValue)+0.17;
}

if (currentValue > sensorMax) {sensorMax = currentValue;}
}
// calcula a corrente considerando a sensibilidade do sensor (185 mV por amper)
//Verifica a maior leitura dentro do tempo do loop.

sensorValue =0;

}

```

Figura 34 - Código sensor de corrente.
Fonte: Autoria própria, 2017

4.2.5. Sensor de rotação

Primeiramente o sensor de rotação que seria utilizado com o princípio de leds emissores e receptores de luz infravermelho, porém a dificuldade de instalação e fixação desse sensor no rotor da máquina tornou inviável, dessa forma fez-se necessário uma mudança de abordagem, portanto foi escolhido um sensor indutivo. O sensor de rotação (tacômetro) utilizado é o XS4P12PA3400 da *Schneider Electric Sensors*. O sensor é alimentado em 12 V pela fonte conectada ao protótipo conforme Figura 35.



Figura 35 - Alimentação sensor de rotação.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Consiste em um sensor indutivo de proximidade de dois fios que para facilidade de instalação no laboratório o cabo que conecta o sensor ao protótipo foi confeccionado com aproximadamente 3 metros. Seu funcionamento é dado quando um material metálico é aproximado de sua superfície o que gera uma saída de 12 V em um dos seus condutores. Para utilização desse sensor em conjunto ao controlador fez-se necessário a redução do sinal de 12 V para 5 V com um circuito divisor de tensão.

Para funcionamento correto do sensor foi implementado um código no controlador para contagem de interrupção, ou seja, a cada momento que um material metálico cruza a frente do sensor é gerado um pulso na entrada digital 2 do controlador conforme apresentado na Figura 36. Dessa forma a instalação do sensor necessita de um material metálico acoplado ao rotor.

```

unsigned int rotacao=0;

//Função para contar o numero de pulsos enviados pelo sensor de rotação.
void blink()
{
  counter++;
}
//Função de interrupção para contar o numero de pulsos em 1 segundo na entrada digital.
void timerIsr()
{
  Timer1.detachInterrupt(); //desabilita o timer1

  rotacao = counter;
  counter=0;

  Timer1.attachInterrupt( timerIsr ); //habilita o timer 1.
}
void setup()
{
  Timer1.initialize(1000000); // Determinar o timer1 para 1 segundo.

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), blink, RISING); //Vincula a rotina de
  //interrupção a entrada digital 2 do arduino.

  Timer1.attachInterrupt( timerIsr ); // Vincula a rotina para o sensor.
}

```

Figura 36 - Código sensor de rotação.
Fonte: Aatoria própria, 2017.

4.2.6. Banco de dados.

O banco de dados foi utilizado em conjunto ao sistema de supervisão através da plataforma Microsoft Acess 2017 e tem a função de armazenar todos as medições recebidas pelo controlador. Os dados são armazenados em forma de evento com registros no decorrer do tempo e em forma de alarmes, que são registros apenas quando acontecem anomalias no sistema.

Os eventos são registrados a cada 300 ms, porém o tempo pode ser alterado conforme necessidade. Os alarmes configurados foram falha de comunicação, tensão igual a 0, rotação muito baixa(rotação=0) e rotação muito alta(rotação>2000).

Dentro dos requisitos do projeto foram consideradas as seguintes informações como pertinentes ao banco de dados de alarmes:

- Estampa de tempo
- Acked (0 para alarme não reconhecido, 1 para alarme reconhecido).
- ActTime (Mostra o horário que o alarme foi reconhecido)
- CurrentValue(Valor da variável)
- EventTime (Horário que aconteceu o evento).
- Message (Texto do alarme)
- Quality (Qualidade do sinal)
- Source (Origem do sinal)

Para o banco de dados referente ao histórico de eventos foi considerado as seguintes informações:

- E3TimeStamp
- Corrente
- Qualidade do sinal da corrente
- Rotação
- Qualidade do sinal da rotação
- Tensão
- Qualidade do sinal de tensão
- Falha de comunicação
- Qualidade do sinal de falha de comunicação.

O banco de dados pode para ser compatível com o sistema de supervisão deve ser em formato .mdb e sua interface gráfica pode ser visualizada na Figura 37.

E3TimeStamp	Acked	AckTime	Area	CurrentValu	EventTime	Message	Quality	Source
25/05/2017 11:18:39	0	00:00:00		0	25/05/2017 11:18:39	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
25/05/2017 11:22:17	0	00:00:00		0	25/05/2017 11:22:16	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
25/05/2017 11:25:11	0	00:00:00		0	25/05/2017 11:25:10	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
25/05/2017 11:25:23	1	2017 11:25:23		0	25/05/2017 11:25:23	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
25/05/2017 11:30:28	0	00:00:00		0	25/05/2017 11:30:28	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
25/05/2017 11:33:59	1	2017 11:33:59		0	25/05/2017 11:33:59	Falha de Comu	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:39:00	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:39:00	Tensão Exitaçã	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:39:00	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:39:00	Tensão FF = 0	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:39:00	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:39:00	Corrente Muit	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:39:00	1	2017 11:33:59		-1	27/05/2017 18:39:00		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:39:00	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:39:00	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:21	0	00:00:00		3780	27/05/2017 18:40:21	Rotação Maior	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:23	0	00:00:00		60	27/05/2017 18:40:23		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:25	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:40:25	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:27	0	00:00:00		1380	27/05/2017 18:40:27		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:29	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:40:29	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:38	0	00:00:00		60	27/05/2017 18:40:38		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:40:40	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:40:40	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:41:02	0	00:00:00		60	27/05/2017 18:41:02		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:41:04	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:41:04	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:41:19	0	00:00:00		60	27/05/2017 18:41:19		Boa (192)	Arduino.
27/05/2017 18:41:21	0	00:00:00		0	27/05/2017 18:41:21	Rotação Muito	Boa (192)	Arduino.

Registro: 14 7 de 32 Sem Filtro Pesquisar

Figura 37 - Banco de dados – Alarmes.
Fonte: Autoria própria, 2017.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Para validar o sistema de supervisão proposto foi elaborado um experimento que consiste em um gerador síncrono alimentando uma carga isolada, para este experimento foram utilizados os seguintes materiais:

- Duas pontes de diodos que suportem tensões de até 220 VCA
- Quatro multímetros sendo dois utilizados para comparar as medidas com o sistema de supervisão.
- Dois variadores de tensões monofásicos 0 – 220 VCA.
- Cabos banana pequenos e grandes.
- Modulo de controle do sistema de supervisão (Arduino +Sensores).

A forma com que o experimento foi elaborado pode ser visto no ANEXO A. Os resultados obtidos foram satisfatórios e atenderam parcialmente as expectativas, no decorrer do desenvolvimento do protótipo problemas principalmente na calibração e leitura dos sensores foram frequentes, porém para um modelo inicial atendeu os requisitos do projeto.

As medições de tensão trouxeram valores muito próximos dos valores de multímetros convencionais com erros de 1 a 3% como é possível observar na figura 36. Além disso, a utilização do transformador faz com que haja isolação de distúrbios da rede que possam eventualmente afetar o controlador, porém o modelo de sensor desenvolvido teve dimensões e custo acima do esperado, já que anteriormente seria utilizado um sensor comercial de baixo custo e tamanho inferior. Para desenvolvimento futuro é possível efetuar a substituição desse sensor por um com tamanho inferior através da troca dos componentes.



Figura 38 - Comparação supervisorio com multímetro.
Fonte: Autoria própria, 2017.

O sensor de corrente após a correta calibração trouxe valores precisos em relação a amperímetros convencionais com erros inferiores a 2% para a faixa de medição de 0 a 20 A conforme apresentado na Figura 39. Apesar disso a dificuldade com este sensor é devido ao comprimento do cabo de conexão do controlador, pois segundo o fabricante a alteração no comprimento do cabo pode trazer problemas para a medição.

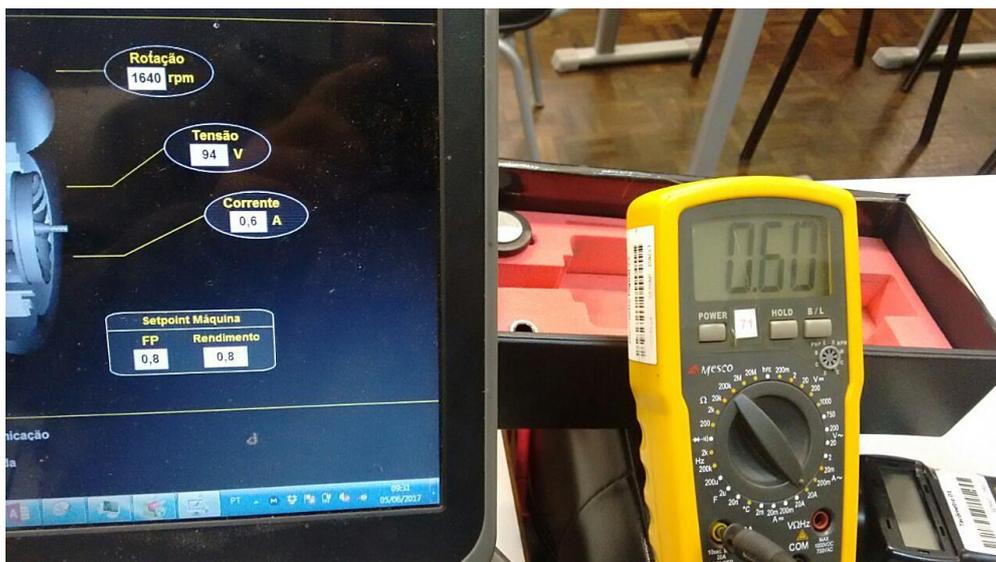


Figura 39 - Comparação supervisorio com amperímetro.
Fonte: Autoria própria, 2017.

As medições de rotação se mostraram eficientes e se compradas com tacômetros comerciais, infravermelho ou de contato não obtiveram medições significativamente diferentes conforme é possível observar na Figura 40. Porém o sensor de rotação utilizado tem um custo muito elevado e não é viável para aplicações pequenas, um aprimoramento do protótipo é encontrar um sensor de rotação barato que possa ser instalado nas máquinas com facilidade.



Figura 40 - Comparação supervisorio e tacômetro.
Fonte: Autoria própria, 2017.

A ferramenta utilizada para desenvolvimento de telas, apesar da versão gratuita, não apresentou limitações para níveis acadêmicos e teve funcionamento

sem grandes dificuldades em conjunto com o controlador e o banco de dados. O controlador para fins acadêmicos se demonstrou eficiente, porém para processamento de um número superior de variáveis ou transmissão dos dados através de módulos WI-FI é necessária a substituição do controlador por um modelo com maior processamento.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi apresentado um sistema de supervisão para máquinas síncronas. Buscando aproximar os alunos das disciplinas que utilizam máquinas síncronas à supervisão de processos em um ambiente industrial. Foi demonstrado que é possível fazer a supervisão através de sensoriamento e interface gráfica em um software de desenvolvimento de telas para supervisório gratuito em um sistema que anteriormente era feito apenas com medições manuais utilizando multímetros, amperímetros e tacômetros.

Apesar de existir modelos de supervisão aplicados no mercado, o objetivo foi aplicar esses modelos para ambientes acadêmicos utilizando plataformas, controladores e sensores de fácil acesso para alunos de universidades.

O principal benefício desse projeto é a implementação de um sistema de supervisão a atividades executadas diariamente pelos alunos nos laboratórios, facilitando o controle das medições e também aumentando a visualização dos alunos sobre a matéria explicada, pois é possível acompanhar em tempo real o comportamento gráfico do experimento realizado.

Apesar de o projeto ter enfoque em máquinas síncronas o sistema de supervisão pode ser utilizado em outras disciplinas para fins educacionais, e tem uma base sólida para desenvolvimento de trabalhos futuros.

O supervisório desenvolvido se comprovou eficaz em relação a precisão de medidas quando comparado a sistemas de medição convencionais como multímetros e tacômetros, as comparações podem ser visualizadas na Figura 41.

	Supervisório	Instrumento
Tensão	94 V	96.2 V
Corrente	0.6 A	0.6 A
Rotação	1660 rpm	1680 rpm

Figura 41 - Tabela comparativa
Fonte: Autoria própria, 2017.

6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando à adaptação e expansão do supervisor desenvolvido, os seguintes estudos são sugeridos:

- Expandir o número de sensores monitorados pelo controlador.
- Trocar os sensores instalados para sensores de melhor desempenho ou menor custo
- Desenvolver um sistema de controle para as máquinas do laboratório utilizando o protótipo.
- Equipar o controlador com expansões que tragam opção para transmissão de dados sem fio.
- Aprimorar o supervisor desenvolvido com biblioteca de peças.
- Utilizar o supervisor como base para aplicação em outras disciplinas.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO, CC. **Arduino**. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 27 de outubro de 2016.
- BAGI. **Geradores Síncronos**. Disponível em:
<<http://excitatrizestatica.com.br/gruposgeradores.htm>> Acesso em: 28 de Outubro de 2016.
- BARBOSA, Gustavo Vinicius Duarte. **Máquinas Síncronas**. Disponível em:
<<http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa>> Acesso em: 29 de Outubro de 2016.
- BOARETTO, Neuri; KOVALESKI, João Luiz; SCANDELARI, Luciano. **Coleta de Dados e Monitoramento de Chão de Fábrica na Manufatura Discreta – Integração com as Ferramentas de Gestão**. XI SIMPEP. São Paulo. 2004.
- BRITANNICA ACADEMIC, **Encyclopedia Britannica**. 2008. Disponível em:
<<http://academic-eb-britannica.ez48.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em 26 de outubro de 2016.
- CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. 2 ed. São Paulo. Érica, 2007.
- ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2000. Disponível em: <<https://www.eletronbras.com>> Acesso em 11 de maio de 2016.
- ELIPSE SOFTWARE. Disponível em:
<<http://www.matizsystems.com/scada-software.asp>> Acesso em 20 de setembro de 2016.
- FEUP. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~ee00264/equipamentos/amperimetro.htm>>
Acesso em 20 de setembro de 2016.
- FITZGERALD, A.E. **Máquinas elétricas**, 6ª Ed., São Paulo. McGraw-Hill, 2006.
- GONÇALVES, Marcelo Giglio. **Monitoramento e Controle de Processos**. SENAI Brasília, 2003.
- KICHALOWSKY, Marco Andrei. **Elipse E3: uma visão geral**. 2011. Disponível em:
<<http://kb.elipse.com.br>>. Acesso em: 06 de Maio de 2016.
- LEÃO, Fabio Bertequini. **Máquinas Síncronas**. Disponível em:
<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica>> Acesso em: 30 de Outubro de 2016.
- MARTINS, Geomar M. **Princípios da Automação Industrial**. Santa Maria, 2012.
- MORAES, Cícero Couto; CASTRUCCI, Plínio. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2007
- MOREIRA, Pedro Manuel Barbosa. **Sistema de Supervisão e Controle de Estruturas**. Porto, Portugal: Dissertação de Mestrado, 2011.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno - Segunda Edição**. Prentice-Hall do Brasil, 1993.

PENIN, Rodriguez. **Sistemas Scada** vol. 2.^a ed. Barcelona. Marcombo, Ediciones Técnicas, 2007.

VASCO, Eduardo Graça dos Santos. **Máquinas Síncronas**. Disponível em: <<http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco>> Acesso em: 29 de Outubro de 2016.

VAZ, Frederico Samuel de Oliveira. **Máquinas Elétricas**. Florianópolis: Curso de Técnico em Eletrotécnica, 2010.

WEG. **Motores síncronos**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net>>. Acesso em: 28 de Outubro de 2016.

ZEILMANN, Rafael. Pereira. **Uma Estratégia para Controle e Supervisão de Processos**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2002.

APÊNDICE A – Roteiro de um ensaio

Ensaio de um gerador síncrono alimentando uma carga isolada utilizando o sistema de supervisão proposto.

Objetivo: Observar na tela do supervisor as medições de tensão, corrente e rotação obtida de um ensaio de gerador síncrono alimentando uma carga isolada.

Componentes utilizados:

- Duas pontes de diodos que suportem tensões de até 220 VCA
- Quatro multímetros sendo dois utilizados para comparar as medidas com o sistema de supervisão.
- Dois variadores de tensões monofásicos 0 – 220 VCA.
- Cabos banana pequenos e grandes.
- Modulo de controle do sistema de supervisão (Arduino +Sensores).

Procedimento:

1. Ligação de um dos variadores de tensão a ponte de diodo de forma a retificar o sinal de saída CA para CC.
2. Este sinal retificado deve ser conectado aos terminais do motor de corrente continua acoplado ao gerador, é necessário conectar aos terminais de alimentação da armadura e de campo.
3. Para garantir que o motor CC funcione em sua zona de operação ideal deve ser instalado um voltímetro na saída da ponte de diodos para medir a tensão aplicada que não deve ultrapassar 220 V (Este valor deve ser consultado na placa do motor).
4. Ligação do segundo variador de tensão a outra ponte de diodos para retificar o sinal CA para CC.
5. O sinal retificado deve ser conectado aos terminais de armadura do gerador e funcionará como excitação. É importante que a corrente de excitação não exceda o limite de operação da máquina, que foi consultado na placa do gerador e para este caso era de no máximo 0,2 A.
6. Medir a corrente de excitação instalando um amperímetro na saída CC da ponte de diodos.

7. Conectar a saída do gerador a um contator para ser possível inserir e retirar a carga sempre que necessário, a saída do contator será conectado a carga isolada.
8. O sistema de supervisão foi conectado exclusivamente para medir e monitorar o comportamento da carga, logo é necessário conectar dois cabos em paralelo a ligação de fase e neutro do gerador as duas entradas disponíveis no protótipo assim medindo a tensão de saída do gerador, conseqüentemente a tensão que a carga está sendo alimentada.
9. Para medição de corrente o medidor pode ser acoplado em qualquer uma das fases conectadas a carga, como se trata de um sensor não invasivo o acoplamento pode ser feito mesmo com o sistema energizado.
10. Verificar se o sensor de rotação está devidamente acoplado a máquina através do suporte que é preso a base do gerador.
11. Executar o arquivo da aplicação do tipo .dom.

Algumas observações para o experimento:

O sistema de supervisão pode ser utilizado em qualquer computador que possua uma entrada USB e tenha o supervisor instalado. Para iniciar a aplicação basta abrir o arquivo do tipo .Dom localizado por padrão dentro da pasta "D:\TCC 2" dessa forma a aplicação já será iniciada e após alguns poucos segundos comunicará com o controlador.

Devem-se tomar alguns cuidados para o correto funcionamento do supervisor. A pasta fonte do domínio não pode ser alterada, a porta USB utilizada do computador deve ser a porta configurada dentro do supervisor e não se pode alterar a configuração do controlador enquanto medições são feitas na tela do supervisor. A ordem para ligação do sistema deve ser sempre a alimentação da máquina CC, excitação do gerador síncrono e ligação da carga ao sistema. Para desligar o sistema a ordem deve ser inversa. Na tela do supervisor é possível acompanhar a rotação do gerador, a tensão que a carga está submetida e a corrente circulando na carga.

A alteração da excitação ou da velocidade da máquina CC gera impactos nas variáveis do gerador e podem ser acompanhadas em tempo real através do sistema de supervisão. Além disso, o banco de dados gerado pelo sistema de supervisão armazena todas as informações medidas durante o experimento.