

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Ana Luísa Vieira Pacheco

**Medidor de produtividade de um motor de britagem
primária trifásico**

São Carlos

2019

Ana Luísa Vieira Pacheco

**Medidor de produtividade de um motor de britagem
primária trifásico**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

**São Carlos
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

VP116m	Vieira Pacheco, Ana Luísa Medidor de produtividade de um motor de britagem primária trifásico / Ana Luísa Vieira Pacheco; orientador Elmer Pablo Tito Cari. São Carlos, 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019. 1. Medidor de produtividade. 2. Britador. 3. Potência ativa. 4. Arduino Uno. 5. PLX-DAQ. 6. Microsoft Excel. 7. Power BI. I. Título.
--------	---

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ana Luísa Vieira Pacheco

Título: “Medidor de produtividade de um motor de britagem primária trifásico”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 22/11/2019,

com NOTA 8,5 (oito, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Gustavo Gonçalves dos Santos - Doutorando - SEL/EESC/USP

Mestre Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e confiança depositados em mim para a conclusão deste trabalho. Agradeço em especial ao meu pai, Luiz Antonio Pacheco, e meu irmão, Lucas Pacheco, pelas sugestões e discussões que, sem dúvidas, contribuíram para o aperfeiçoamento do projeto.

Agradeço ao meu namorado, Lucas Isla, por toda paciência e tempo dedicado a me ajudar.

Agradeço ao Edvaldo da Silva Santos por toda ajuda na montagem do painel elétrico.

Agradeço ao Professor Elmer por toda disponibilidade, ajuda e por ter acreditado neste projeto.

RESUMO

Pacheco, A. L. V. **Medidor de produtividade de um motor de britagem primária trifásico**. 2019. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este trabalho contemplou o desenvolvimento de um medidor de produtividade de um motor de britagem primária para a Pedreira Santa Cornélia. A solução desenvolvida pode ser dividida em três grandes blocos: cálculo da potência ativa do motor, cálculo da produtividade e elaboração de um painel de controle para visualização dos dados. O cálculo da potência ativa do motor é realizado através de um circuito de medição de corrente e tensão ligado a um Arduino UNO, o qual é responsável por amostrar os sinais e realizar o cálculo da potência ativa. O cálculo da produtividade é realizado em um arquivo da *Microsoft Excel*, onde os dados de potência ativa são enviados do Arduino UNO via o *software* PLX-DAQ e utiliza-se uma curva de tendência (obtida através de ensaios com variadas cargas no motor) entre a potência ativa e a altura das pedras na câmara do britador para calcular a produtividade para cada ponto de potência ativa. O painel de controle de dados foi desenvolvido utilizando a ferramenta *Power BI*, onde é possível selecionar para visualização a média da produtividade por período de tempo (seleção dos dias que deseja visualizar), hora e minuto e a média da potência ativa por período de tempo e minuto. Com o medidor de produtividade é possível compreender o sistema produtivo da empresa e elaborar planos de ação mais assertivos e com métricas claras para atingir melhores resultados econômicos e obter maior controle da sua produção.

Palavras-chave: Medidor de produtividade. Britador. Potência ativa. Arduino UNO. PLX-DAQ. *Microsoft Excel*. *Power BI*.

ABSTRACT

Pacheco, A. L. V. **Productivity meter for a three-phase primary crushing motor**. 2019. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This study followed the development of a rock crusher productivity meter for Santa Cornelia rock crusher plant. The solution was broken in three big blocks: the motor active power calculation, the productivity calculation and preparation of a control panel for data visualization. The active power is calculated through a current and tension measurement circuit linked to a Arduino UNO, which is responsible to sample the signs and calculate the active power. The productivity is calculated in a Microsoft Excel file, where the Arduino UNO sends the active power data through the software PLX-DAQ, and uses a trend curve (obtained after experiments with diversified motor loads) between the active power and the height of stones in crusher chamber to calculate the productivity for each data point of the active power. The data control panel was developed with the Power BI tool, in which is possible to visualize the average of productivity broken in a given period (selection of days which one wishes to visualize), hour and minute, and the average of the active power broken in time period and minute. The productivity meter enables a better understanding of the productive system of the company and develop better assertive action plans with clear metrics to reach better economic results and gain a better control of the production

Keywords: Productivity meter. Rock crusher. Active power. Arduino UNO. PLX-DAQ. Microsoft Excel. Power BI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Processo de britagem da Pedreira Santa Cornélia	22
Figura 1.2 – Britador primário da Pedreira Santa Cornélia	22
Figura 1.3 – Alimentador do britador primário da Pedreira Santa Cornélia	23
Figura 2.1 – Vista em corte de um motor de indução trifásico (WEG, 2015)	25
Figura 2.2 – Desenho esquemático de um rotor gaiola de esquilo (CHAPMAN, 2013)	26
Figura 2.3 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução (CHAPMAN, 2013)	28
Figura 2.4 – Diagrama do fluxo de potência em um motor de indução. (CHAPMAN, 2013)	28
Figura 2.5 – Curva característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução típico. (CHAPMAN, 2013)	29
Figura 2.6 – Triângulo retângulo de potência	30
Figura 2.7 – Estrutura básica de um transformador de duas bobinas	32
Figura 2.8 – Esquema de um transformador de corrente. (CHAPMAN, 2013)	33
Figura 2.9 – Placa Arduino Uno. (MCROBERTS, 2015)	35
Figura 2.10–Exemplo de relatório criado no <i>Power BI</i> . (POWERBI, 2019)	36
Figura 3.1 – Metodologia do projeto	37
Figura 3.2 – Diagrama unifilar da ligação do TC e TP	37
Figura 3.3 – Diagrama trifásico da ligação do TC e TP	38
Figura 3.4 – Circuito condicionador do sinal de saída do TC	39
Figura 3.5 – Circuito condicionador do sinal de saída do TP	40
Figura 3.6 – Comportamento do sinal após o buffer para $V_{entrada} = 5V$	40
Figura 3.7 – Comportamento do sinal após o buffer para $V_{entrada} = 15V$	40
Figura 3.8 – Sinal de saída V4 do amplificador operacional U2 para $V_{entrada} = 5V$	41
Figura 3.9 – Sinal de saída V4 do amplificador operacional U2 para $V_{entrada} = 15V$	41
Figura 3.10–Sinal de entrada do Arduino para $V_{entrada} = 5V$	42
Figura 3.11–Sinal de entrada do Arduino para $V_{entrada} = 15V$	42
Figura 3.12–Diagrama unifilar do circuito medidor de potência ativa	43
Figura 3.13–Diagrama trifásico do circuito medidor de potência ativa	43
Figura 3.14–Etapas da medição de corrente do motor	44
Figura 3.15–Etapas da medição de tensão do motor	44
Figura 3.16–Fluxograma da rotina de configuração	46
Figura 3.17–Fluxograma da rotina de interrupção 1	47
Figura 3.18–Interface do software PLX-DAQ	48
Figura 3.19–Fluxograma da rotina de interrupção 2	49
Figura 3.20–Coeficientes do filtro de rejeição de harmônicos calculado no Python	50

Figura 3.21–Desenho esquemático do britador da Pedreira Santa Cornélia (JAW-MASTER, 1997)	51
Figura 3.22–Prisma pentagonal	52
Figura 3.23–Semelhança de triângulo para cálculo do volume da câmara	52
Figura 3.24–Proposta da interface de visualização dos dados	55
Figura 4.1 – Circuito de instalação do TC para realização dos ensaios	57
Figura 4.2 – Sinal de saída do TC com o motor em vazio e com carga para $R = 0,1\Omega$	57
Figura 4.3 – Sinal de saída do TP com o motor em vazio e com carga	58
Figura 4.4 – Circuito de adequação do sinal e proteção do Arduino	59
Figura 4.5 – Circuito implementado para realização de testes	59
Figura 4.6 – Painel com os dispositivos utilizados	60
Figura 4.7 – Circuito final implementado	60
Figura 4.8 – (a) Sinal de saída do TC com duração de 0,3s (b) Sinal correspondente à corrente no motor utilizado para implmentar a FFT	61
Figura 4.9 – (a) Sinal de saída do TC com duração de 0,6s (b) Sinal correspondente à corrente no motor utilizado para implmentar a FFT	62
Figura 4.10–Amplitude do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,3s	62
Figura 4.11–Amplitude do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,6s	63
Figura 4.12–Fase do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,3s	63
Figura 4.13–Fase do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,6s	64
Figura 4.14–Sinal de validação do algoritmo visto através do osciloscópio	65
Figura 4.15–Sinal de validação do algoritmo visto através do Arduino	65
Figura 4.16–Potência ativa, tensão e corrente RMS e potência aparente calculados no Arduino	66
Figura 4.17–Sinal de corrente e tensão amostrado sem o valor do offset	66
Figura 4.18–Sinal de corrente e tensão amostrado sem o valor do offset e harmônicos	67
Figura 4.19–Curva de tendência entre a altura das pedras na câmara do britador e a potência ativa	71
Figura 4.20–Aba "Configurações"do arquivo <i>Excel</i> para cálculo da produtividade	72
Figura 4.21–Aba "Dados"do arquivo <i>Excel</i> para cálculo da produtividade	73
Figura 4.22–Aba "Dados"do arquivo <i>Excel</i> para cálculo da produtividade preenchido para um dia de medição	73
Figura 4.23–Aba "Resultados"do arquivo <i>Excel</i> para cálculo da produtividade	74
Figura 4.24–Aba "Resultados"do arquivo <i>Excel</i> para cálculo da produtividade preenchido para um dia de medição	75

Figura 4.25–Relatório final de produtividade do motor de britagem primária	76
Figura 4.26–Relatório final de produtividade do motor de britagem primária com filtragem de dados para às 9h do dia 17/10/2019	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de letras de código indicando os kVA por HP do valor nominal de partida de um motor considerando rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)	31
Tabela 3.1 – Dados esperados após o ensaio com diferentes cargas	54
Tabela 4.1 – Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor em vazio	68
Tabela 4.2 – Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor com 32% da carga	69
Tabela 4.3 – Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor com 100% da carga	70
Tabela 4.4 – Produtividade e potência ativa após o ensaio com diferentes cargas . .	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI	- Confederação nacional da indústria
TC	- Transformador de corrente
TP	- Transformador de potencial
cv	- Cavalo-vapor
LTDA	- Limitada
RMS	- Valor quadrático médio
MIT	- Motor de indução trifásico
CA	- Corrente alternada
HP	- Horse-power
kVA	- Kilovoltampere
DC	- Corrente contínua
CC	- Corrente contínua
Vpp	- Volts de pico a pico
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
FP	- Fator de potência
GND	- Terra
FFT	- Transformada rápida de Fourier
A/D	- Analógico/digital
R_T	- Relação de transformação

LISTA DE SÍMBOLOS

N_1	- Número de espiras no estator
N_2	- Número de espiras no rotor
E_1	- Tensão eficaz no estator
E_2	- Tensão eficaz no rotor
n	- Velocidade do rotor
n_s	- Velocidade síncrona do estator
p	- Número de polos
s	- Escorregamento do motor
f_1	- Frequência no estator
f_2	- Frequência relativa no enrolamento do rotor
R_1	- Resistência do estator
X_1	- Reatância do estator
R_c	- Resistência de perdas no núcleo
X_M	- Reatância de magnetização
R_2	- Resistência do rotor
X_2	- Reatância do rotor
P_{PCE}	- Potência de perdas no cobre do estator
P_{PCR}	- Potência de perdas no cobre do rotor
I_m	- Corrente do motor do britador primário
V_m	- Tensão do motor do britador primário
$Arduino_{out,I}$	- Sinal de saída do Arduino referente à medição de corrente
$Arduino_{out,V}$	- Sinal de saída do Arduino referente à medição de tensão
H_1	- altura da câmara do britador primário
H_2	- altura útil da câmara do britador primário

W1	- largura de alimentação da câmara do britador primário
W2	- largura de saída da câmara do britador primário
W3	- largura da câmara do britador primário considerando a altura útil
W4	- largura da câmara do britador primário considerando metade da altura útil
D	- profundidade da câmara do britador primário
FPB	- Filtro passa-baixa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação e definição do problema	21
1.2	Objetivos	23
1.3	Organização do trabalho	23
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	25
2.1	Motor de indução trifásico	25
2.1.1	Rotor	26
2.1.2	Potência e conjugados em motores de indução	28
2.1.3	Potência ativa	29
2.1.4	Partida do motor	31
2.2	Transformadores	31
2.2.1	Transformador de potencial	32
2.2.2	Transformador de corrente	32
2.3	Arduino	33
2.3.1	Especificação da placa Arduino UNO	34
2.4	Power BI	35
3	METODOLOGIA	37
3.1	Sistema de medição de tensão e corrente	37
3.2	Adequação do sinal e proteção do Arduino Uno	39
3.3	Implementação dos circuitos	42
3.4	Programação do Arduino Uno para aquisição do sinal e realização dos cálculos	45
3.4.1	Rotina de configurações	45
3.4.2	Rotina de Interrupção 1: Cálculo da potência ativa	46
3.4.3	Rotina de Interrupção 2: Amostragem dos sinais de corrente e tensão	48
3.5	Ensaio com diferentes cargas	50
3.5.1	Britador de mandíbulas	50
3.5.2	Ensaio	53
3.6	Visualização dos dados de produtividade	54
4	RESULTADOS	57
4.1	Sistema de medição de tensão e corrente	57
4.2	Implementação dos circuitos	58

4.3	Programação do Arduino Uno aquisição dos sinais e realização dos cálculos	61
4.3.1	Rotina de interrupção 1: Cálculo da potência ativa	61
4.3.2	Rotina de Interrupção 2: Amostragem dos sinais de corrente e tensão	66
4.4	Ensaio com diferentes cargas	67
4.4.1	Ensaio no motor em vazio	67
4.4.2	Ensaio no motor com 32% da carga	68
4.4.3	Ensaio no motor com 100% da carga	69
4.4.4	Relação entre produtividade e potência ativa	70
4.5	Visualização dos dados de produtividade	71
4.5.1	Cálculo da produtividade	71
4.5.2	Relatório no Power BI	75
5	CONCLUSÃO	79
5.1	Conclusão geral	79
5.2	Trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A – PROGRAMA IMPLEMENTADO NO ARDUINO UNO	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e definição do problema

No atual cenário econômico brasileiro é de grande importância o acompanhamento da eficiência e produtividade em vários setores da cadeia produtiva. Uma das maneiras de se medir a eficiência é relacionar o quanto se produz em relação ao quanto deveria ser produzido, e a produtividade através da relação entre a produção final e os insumos utilizados (MACEDO, 2012). Segundo a confederação nacional das indústrias (CNI), as indústrias de produtos minerais não metálicos utilizaram em média 77% da sua capacidade de produção no ano de 2018 (CNI, 2018). Com o acompanhamento dos indicadores de eficiência e produtividade é possível aumentar a utilização da capacidade de produção através da otimização da quantidade de produtos no final da cadeia, acompanhamento de métricas, objetivos e metas, a fim de aumentar a competitividade no mercado e obter melhores resultados econômicos.

Uma pedreira de granito para construção civil realiza suas atividades através da extração de minérios de uma jazida com a finalidade de obter pedras de diversas granulometrias. Após a extração do material rochoso através da detonação da jazida, o minério passa pelo processo de britagem que é responsável por reduzir, dar forma e classificar o material para ser comercializado. O processo de britagem que será estudado, pode ser observado pela Fig. 1.1, e é composto por três britadores e se inicia com um caminhão basculante, com caçamba específica para minério, que transporta de tempos em tempos o material da jazida até o alimentador que direciona as pedras para o britador primário, que pode ser visto na Fig. 1.2, responsável pelo primeiro processo de fragmentação do material extraído da rocha, e é composto por uma mandíbula fixa e uma oscilante, a qual precisa de um motor de grande porte para movimentá-la e realizar o fracionamento do minério. Na Fig. 1.3 é possível visualizar o alimentador cheio de pedras. Já os britadores secundários e terciários necessitam de motores menores uma vez que as pedras que passam por eles possuem uma granulação menor. Uma vez que o britador primário não é abastecido constantemente, o motor opera com ociosidade, trabalhando em vazio uma parte do tempo, com valores acentuados de corrente e um alto gasto de energia elétrica. O maior desafio é manter a câmara do britador primário sempre cheia, a fim de aumentar a produtividade e minimizar o desgaste do material da mandíbula.

A proposta deste projeto é a medição da produtividade do motor de 100 cv (cavalo-vapor), 6 polos, 220V, rotor do tipo gaiola de esquilo e código H da britagem primária da Pedreira Santa Cornélia Indústria e Comércio de Minerais LTDA, localizada na cidade de Roseira, estado de São Paulo. A análise de produtividade será a partir da potência ativa do motor de britagem primária, que está relacionada ao volume de pedras na câmara do

britador.

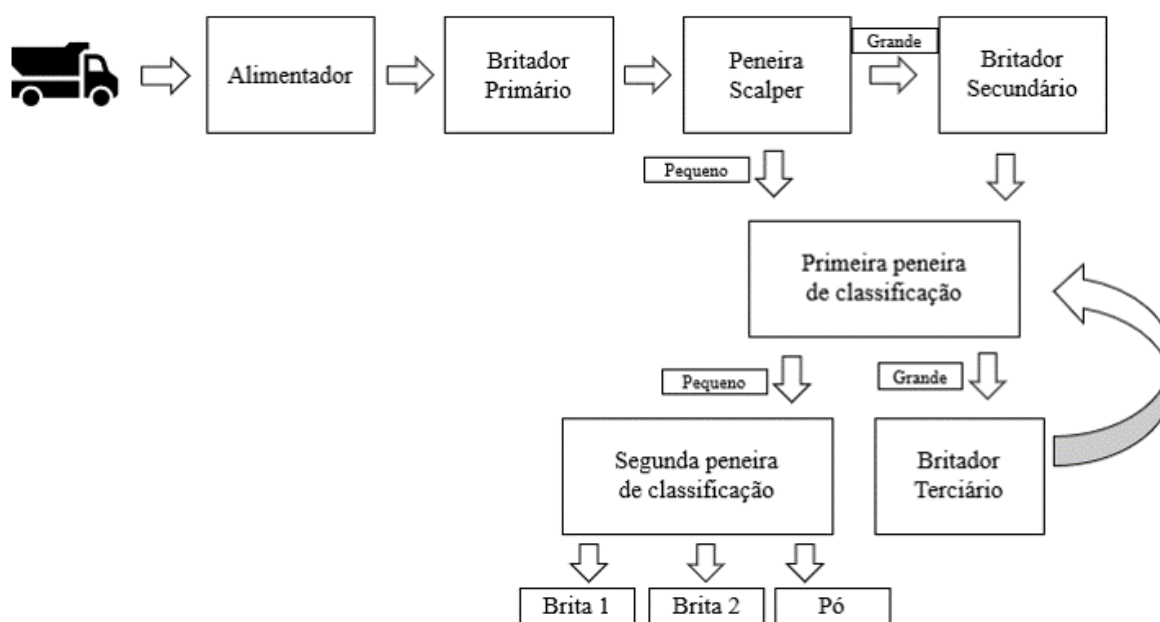


Figura 1.1: Processo de britagem da Pedreira Santa Cornélia

Fonte: elaborado pelo autor



Figura 1.2: Britador primário da Pedreira Santa Cornélia



Figura 1.3: Alimentador do britador primário da Pedreira Santa Cornélia

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Estudo sobre motores assíncronos de indução trifásico e a medição de tensão e corrente;
- Estudo sobre cálculo de tensão e corrente RMS a partir de um sinal amostrado;
- Uso de Arduino UNO para monitoramento da potência ativa;
- Implementação do medidor de potência na Pedreira Santa Cornélia;
- Realização de testes com diferentes cargas;
- Estudo sobre a relação entre a potência ativa e a produtividade do motor;
- Criação de uma interface para visualização dos dados de produtividade e de potência ativa do motor de britagem primária.

1.3 Organização do trabalho

O Capítulo 2 intitulado Embasamento Teórico apresenta uma breve explicação acerca de britadores, motores trifásicos de indução, comportamento e medição de corrente

e tensão trifásicas, o funcionamento e especificações do Arduino UNO e do Power BI. O Capítulo 3 intitulado Metodologia apresenta as características, parâmetros, cálculos e componentes utilizados na implementação do projeto. O Capítulo 4 intitulado Resultados apresenta o funcionamento do medidor de potência para cálculo da produtividade e o relatório com dados de produtividade e potência ativa. Por fim, o Capítulo 5 intitulado Conclusão é uma avaliação de todo o trabalho desenvolvido ao longo do projeto e apresenta sugestões de próximos passos.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Motor de indução trifásico

A máquina de indução é a mais utilizada na indústria dentre as máquinas elétricas e entre as suas vantagens estão o baixo custo de aquisição, de manutenção, robustez e o torque de partida não nulo. Porém também há desvantagens como o difícil controle da velocidade, a corrente de partida elevada e o baixo fator de potência (sempre indutivo) (SEN, 2012).

Um MIT (motor de indução trifásico) é composto por três bobinas (estator) posicionadas a 120° uma da outra e são alimentadas por um sistema trifásico. As bobinas do estator (armadura) ao serem conectadas a uma fonte CA (corrente alternada), um fluxo girante com a mesma frequência da tensão de alimentação é produzido nos enrolamentos do estator, atravessando o entreferro e o rotor. O fluxo girante induz tensão no enrolamento do rotor, e caso os enrolamentos estejam em curto-circuito, surgirão correntes induzidas, que produzirão uma segunda distribuição de fluxos no rotor. Como o campo girante induz tensão no enrolamento do rotor, ele não é alimentado diretamente e sim por indução. A busca por alinhamento entre os fluxos girantes do rotor e do estator produz o torque no MIT. Assim, a velocidade de regime do eixo do rotor nunca será síncrona com o campo girante do estator, de modo que o enrolamento do rotor nunca esteja exposto a um fluxo magnético constante, o qual não produziria correntes induzidas e torque. Devido ao fato das velocidades não serem síncronas, surge a denominação de máquinas assíncronas (CHAPMAN, 2013). A Fig. 2.1 ilustra uma vista em corte de um MIT, evidenciando seus componentes.

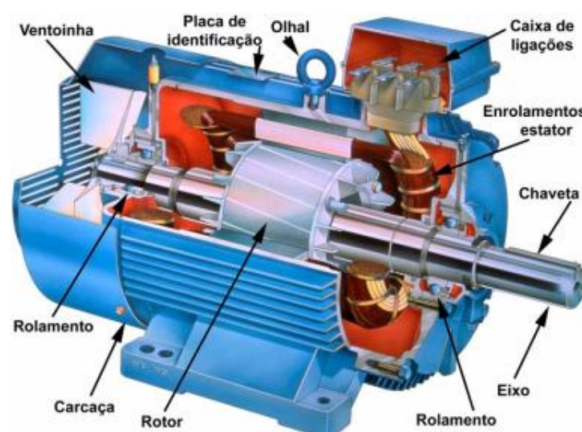


Figura 2.1: Vista em corte de um motor de indução trifásico (WEG, 2015)

2.1.1 Rotor

O rotor pode ter o enrolamento bobinado como o do estator ou pode ter o enrolamento tipo gaiola de esquilo, como mostrado na Fig. 2.2.

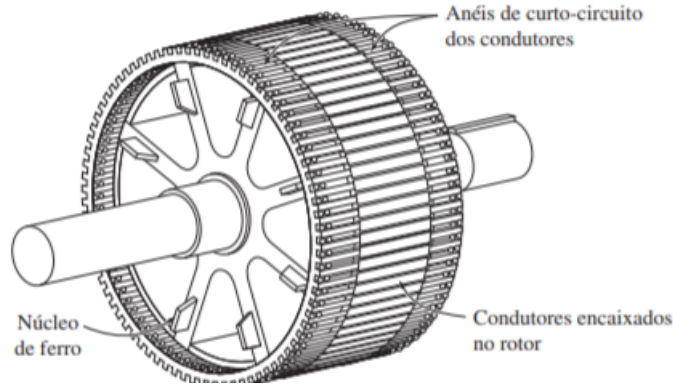


Figura 2.2: Desenho esquemático de um rotor gaiola de esquilo (CHAPMAN, 2013)

Caso o rotor esteja em aberto, não haverá corrente induzida e o rotor permanece parado. O campo girante do entreferro induz tensão nos enrolamentos do rotor e do estator com a mesma frequência. A tensão de pico em uma das fases do rotor e estator pode ser calculada através da Lei de Faraday, expresso pela Eq. (2.1), onde N_c é o número de espiras, ϕ é o fluxo magnético e ω é a velocidade angular (CHAPMAN, 2013).

$$E_{max} = N_c \phi \omega \quad (2.1)$$

Como $\omega = 2\pi f$, pode-se escrever a Eq. (2.1) como:

$$E_{max} = 2\pi N_c \phi f \quad (2.2)$$

Para encontrar a tensão eficaz, basta dividir a equação por $\sqrt{2}$:

$$E = \frac{2\pi N_c \phi f}{\sqrt{2}} = 4,44 N_c \phi f \quad (2.3)$$

Considerando E_1 a tensão eficaz no estator e E_2 a tensão eficaz no rotor, temos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 N_1 \phi f}{4,44 N_2 \phi f} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

Portanto, conclui-se que se os terminais do rotor estiverem em aberto, o motor de indução comporta-se como um transformador com relação de transformação $N_1:N_2$.

Caso os terminais do rotor estejam curto-circuitados, o campo do estator induz uma tensão no rotor, que produz uma corrente induzida responsável pela interação com o campo girante no entreferro produzindo torque, assim o rotor começa a girar na direção do campo girante, de modo a diminuir a velocidade relativa entre os dois. Essa diferença entre a velocidade síncrona do campo girante do estator n_s e a velocidade do rotor n é denominada escorregamento do motor s . Caso o motor esteja parado, a velocidade do rotor n é zero e o escorregamento s é um, caso n seja igual a n_s , o torque será nulo e o escorregamento será zero. Segue na Eq. (2.5) o escorregamento relativo, expresso como uma fração da velocidade síncrona n_s e na Eq. (2.7) a velocidade do motor de indução em função no número de polos p e frequência f (FITZGERALD, 2014).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.5)$$

Assim, temos que a velocidade relativa do rotor em relação ao campo girante do estator é:

$$n_s - n = sn_s \quad (2.6)$$

$$ns = \frac{120f}{p} \quad (2.7)$$

Substituindo a Eq. (2.6) na Eq. (2.7), encontra-se a frequência relativa no enrolamento do rotor f_2 em relação a frequência do estator f_1 :

$$f_2 = \frac{p}{120}(n_s - n) = \frac{p}{120}sn_s = s\frac{p}{120}n_s = sf_1 \quad (2.8)$$

Uma vez que o motor de indução quando está bloqueado (em aberto) tem o mesmo funcionamento que um transformador, o circuito equivalente de um motor de indução será semelhante ao de um transformador. A Fig. 2.3 ilustra o circuito equivalente de um motor de indução com os parâmetros do rotor referidos ao lado do estator. Logo na entrada do motor existe a resistência e a reatância de dispersão do estador R_1 e X_1 , respectivamente. Uma vez que há a necessidade de um entreferro de ar, há perdas no núcleo, representadas por R_C e uma reatância de magnetização X_M . Como na entrada do motor, na saída também há a resistência R_2 e a reatância de dispersão X_2 do rotor (CHAPMAN, 2013).

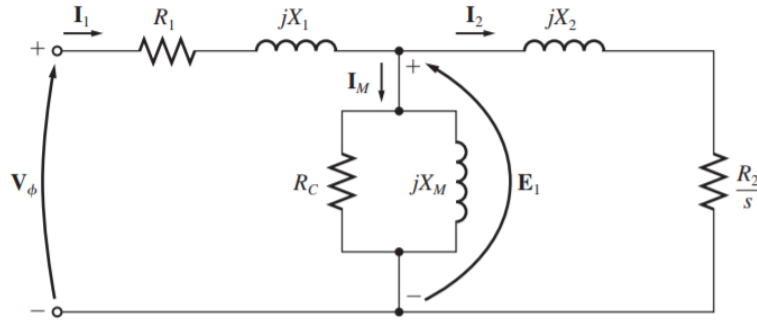


Figura 2.3: Circuito equivalente por fase de um motor de indução (CHAPMAN, 2013)

2.1.2 Potência e conjugados em motores de indução

O diagrama de potência de um motor de indução pode ser observado na Fig. 2.4. A potência de entrada $P_{entrada}$ é na forma de tensões e correntes trifásicas, representada pela Eq. (2.9), onde V_T é a tensão do terminal de linha e I_L é a corrente de linha de entrada no motor e θ é a diferença de fase entre V_T e I_L . As perdas começam nos enrolamentos do estator, como visto na Eq. (2.10). Em seguida, há um fluxo de potência perdida em forma de histerese e corrente parasita no núcleo do estator. A potência restante nesse ponto é transferida ao rotor da máquina através do entreferro entre o estator e o rotor. Após essa etapa também há dissipação de potência no cobre do rotor, representada pela Eq. (2.11), logo após essa perda, denominamos a potência restante de $P_{convertida}$. Antes da potência ser convertida em potência mecânica na carga, há perdas por atrito e ventilação, além de perdas suplementares difíceis de serem elencadas. Para obter o rendimento do motor, basta compreender quanto da potência elétrica foi transformada em potência mecânica, onde pode ser calculado pela Eq. (2.12). (CHAPMAN, 2013)

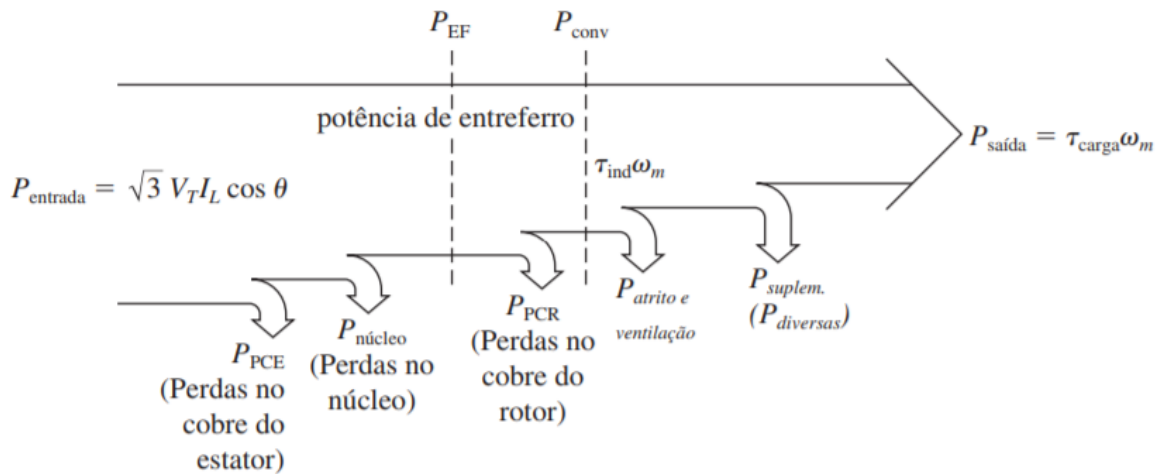


Figura 2.4: Diagrama do fluxo de potência em um motor de indução. (CHAPMAN, 2013)

$$P_{entrada} = \sqrt{3}V_T I_T \cos\theta \quad (2.9)$$

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.10)$$

$$P_{PCR} = 3I_2^2 R_1 \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2.12)$$

Uma vez que os campos do estator e do rotor giram cada um sincronicamente, eles são estacionários entre si, e produzem um conjugado constante que mantém a rotação do rotor. Esse conjugado, que existe para qualquer velocidade n do rotor é denominado conjugado assíncrono. A Fig. 2.5 traz a curva típica de conjugado versus velocidade para motor de indução típico. (CHAPMAN, 2013)

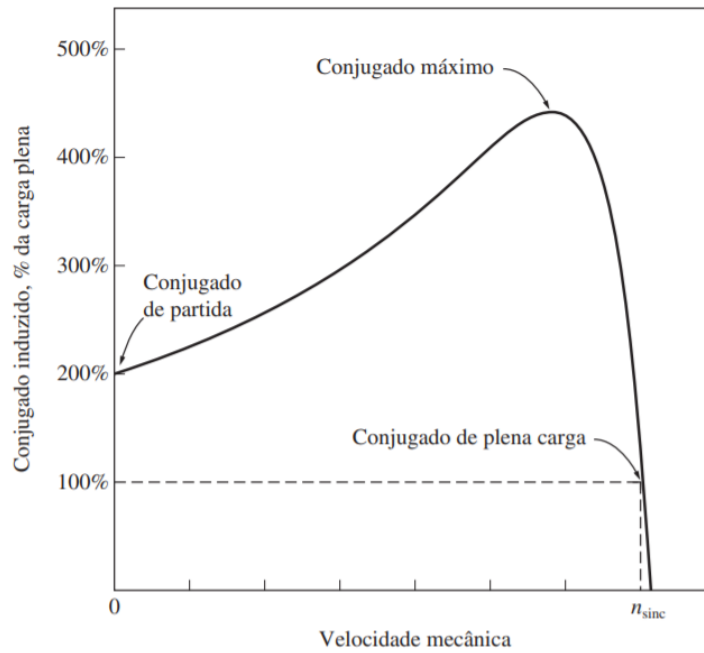


Figura 2.5: Curva característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução típico. (CHAPMAN, 2013)

2.1.3 Potência ativa

A maioria das cargas das unidades consumidoras consome energia reativa indutiva, como, por exemplo, motores, transformadores, reatores para lâmpadas de descarga e fornos de indução. As cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para seu funcionamento, por isso sua operação requer dois tipos de potência, a ativa e a reativa.

A potência ativa é a que efetivamente realiza trabalho gerando, por exemplo, calor, luz ou movimento. Já a potência reativa é usada apenas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas. Dessa maneira, enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa. Segue na Fig. 2.6 que traz a relação trigonométrica entre as potências.

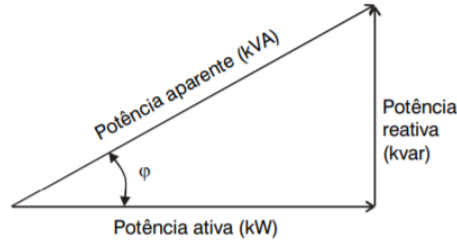


Figura 2.6: Triângulo retângulo de potência

A potência ativa ou potência ativa média pode ser matematicamente calculada pela Eq. (2.13), onde ϕ é a fase entre o sinal de tensão e corrente. Ao trabalhar em tempo discreto, o equivalente é representado pela Eq. (2.14), onde N é o número total de amostras, $v(n)$ e $i(n)$ são as amostras para n entre 0 e N . A potência aparente e o fator de potência (fase entre o sinal de tensão e corrente) também podem ser calculados em tempo discreto, como descrevem as Eqs. (2.17) e (2.18). (ATMEL, 2013)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt = V_{RMS}I_{RMS}\cos(\phi) \quad (2.13)$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(n)i(n) \quad (2.14)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(n)^2} \quad (2.15)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i(n)^2} \quad (2.16)$$

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (2.17)$$

$$FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (2.18)$$

2.1.4 Partida do motor

A partida do motor de indução pode ser feita de maneira direta, ligando-o na linha de potência. A partida direta apenas não é recomendada quando a corrente de partida é muito alta e pode causar uma grande queda de tensão no sistema. Para o caso em que o rotor é do tipo gaiola de esquilo, a corrente de partida pode variar amplamente dependendo da potência nominal e da resistência do rotor. Para auxiliar no cálculo da corrente de partida neste caso, utiliza-se uma classificação por letra de código, onde há limites para a quantidade de corrente que o motor pode consumir na partida a partir da potência aparente de partida em função da potência nominal em HP ($1 \text{ cv} = 0,9863 \text{ HP}$). Segue na Tab. 2.1 a relação da potência aparente por HP para cada código do motor. As Eq. (2.19) e Eq. (2.20) demonstram, respectivamente, a potência aparente de partida $S_{partida}$ e a corrente de partida $I_{partida}$.

Tabela 2.1: Tabela de letras de código indicando os kVA por HP do valor nominal de partida de um motor considerando rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)

Letra de código nominal	kVA/HP	Letra de código nominal	kVA/HP
A	0-3,15	L	9,00-10,00
B	3,15-3,55	M	10,00-11,20
C	3,55-4,00	N	11,20-12,50
D	4,00-4,50	P	12,50-14,00
E	4,50-5,00	R	14,00-16,00
F	5,00-5,60	S	16,00-18,00
G	5,60-6,30	T	18,00-20,00
H	6,30-7,10	U	20,00-22,40
J	7,10-8,00	V	22,40-acima
K	8,00-9,00		

$$S_{partida} = (\text{potência nominal em HP})(\text{fator da letra de código}) \quad (2.19)$$

$$I_{partida} = \frac{S_{partida}}{\sqrt{3}V_T} \quad (2.20)$$

Uma maneira de reduzir a corrente de partida é fazer uma ligação Y- Δ durante o processo de partida. Se o enrolamento de estator do motor for mudado de uma ligação Δ para uma ligação Y, a tensão de fase no enrolamento diminuirá pelo fator $\sqrt{3}$. Após a partida, quando o motor estiver próximo de atingir a velocidade plena, os enrolamentos do estator podem ser abertos e religados em Δ (CHAPMAN, 2013).

2.2 Transformadores

O transformador é dispositivo de grande importância para a engenharia. Sua composição é basicamente duas ou mais bobinas e um caminho entre elas, que gera um

circuito magnético. Quando uma tensão é aplicada ao primário de um transformador, um fluxo é produzido no núcleo conforme é dado pela Lei de Faraday. O fluxo que está se alterando no núcleo induz uma tensão no enrolamento secundário do transformador. Como os núcleos dos transformadores têm permeabilidade muito elevada, a força magnetomotriz líquida necessária no núcleo para produzir seu fluxo é muito pequena. Uma vez que a força magnetomotriz líquida é muito pequena, a força magnetomotriz do circuito primário deve ser aproximadamente igual e oposta à força magnetomotriz do circuito secundário. Esse fato leva à razão de correntes do transformador. (CHAPMAN, 2013)

Há três principais funções dos transformadores: aumentar ou diminuir valores de tensão e corrente, realizar o casamento de impedâncias e isolar circuitos, sendo empregados em diversos cenários, como, por exemplo, sistemas de distribuição, medição de sistema/rede e projetos eletrônicos.

2.2.1 Transformador de potencial

Um transformador de potencial é um transformador especialmente enrolado com um primário de alta tensão e um secundário de baixa tensão. Ele apresenta uma potência nominal muito baixa e sua única finalidade é fornecer uma amostra da tensão do sistema de potência aos instrumentos que o monitoram. Como o propósito principal do transformador é a amostragem de tensão, ele deve ser muito exato para não distorcer seriamente os valores verdadeiros de tensão. A composição de um transformador de duas bobinas pode ser vista na Fig 2.7 e o cálculo da relação de transformação considerando o núcleo de ferro está descrita na Eq. (2.4). (CHAPMAN, 2013)

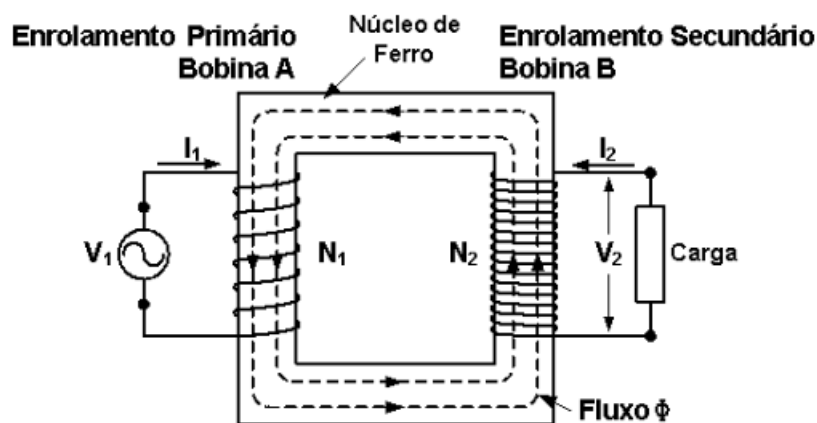


Figura 2.7: Estrutura básica de um transformador de duas bobinas

2.2.2 Transformador de corrente

O transformador funciona através da obtenção de uma amostra da corrente que flui em uma linha e a reduz a um nível seguro e mensurável. Um diagrama de transformador de corrente típico é apresentado na Fig. 2.8, onde um enrolamento secundário enrolado em

torno de um anel ferromagnético, com o primário constituído simplesmente pela linha que passa através do centro do anel. O anel ferromagnético retém e concentra uma pequena amostra do fluxo oriundo da linha do primário. A seguir, esse fluxo induz uma tensão e uma corrente no enrolamento secundário. (CHAPMAN, 2013)

Um transformador de corrente é diferente do transformador de potencial, porque seus enrolamentos são fracamente acoplados. Assim, diferentemente de todos os outros transformadores, o fluxo mútuo no transformador de corrente é menor do que o fluxo de dispersão. Apesar do acoplamento fraco, a corrente no secundário de um transformador de corrente é diretamente proporcional à uma corrente muito maior do primário e, desse modo, o dispositivo poderá fornecer uma amostra exata da corrente de linha para propósitos de mensuração. As especificações nominais de um transformador de corrente são dadas como razões de correntes entre o primário e o secundário. Uma especificação de 5A é um valor usado como padrão para o secundário de um transformador de corrente. É importante que o transformador de corrente esteja permanentemente em curto circuito, porque tensões extremamente elevadas poderão surgir se os terminais do enrolamento secundário estiverem abertos. (CHAPMAN, 2013)

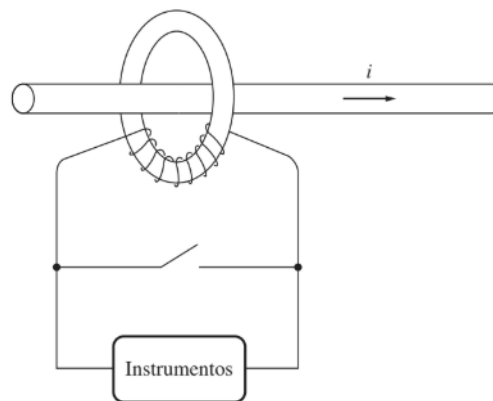


Figura 2.8: Esquema de um transformador de corrente. (CHAPMAN, 2013)

2.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma *open-source* para construção de projetos eletrônicos, composto por dois elementos: a placa física Arduino (*hardware*) e o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino (IDE), que é um *software* executado no computador em que o código de programação é escrito e enviado para a placa física, através da comunicação USB. O IDE Arduino utiliza uma versão simplificada de C/C++, que facilita o aprendizado e a implementação. O Arduino funciona como um pequeno computador, capaz de ler entradas, controlar saídas e tornar processos automáticos, porém com limitações de processamento. Existem vários modelos de placas de Arduino e o modelo Arduino Uno será utilizado neste projeto.

2.3.1 Especificação da placa Arduino UNO

A placa Arduino UNO possui um conversor A/D de 6 canais, de 10 bits cada (entradas analógicas). Isso significa que irá mapear tensões entre 0 e a tensão operacional (5V ou 3,3V) para valores inteiros entre 0 e 1023. A Fig. 2.9 mostra uma placa Arduino Uno e os pinos indicados representam:

- 1: Conector USB
- 2: Conector Jack, por onde é feita a alimentação da placa caso não esteja conectado em um computador
- 3: Pino para conexão do GND. Todos os pinos GND da placa podem ser utilizados para aterrar o circuito
- 4: Fonte de 5V para alimentar placas ou circuitos externos
- 5: Fonte de 3,3V para alimentar placas ou circuitos externos
- 6: Entradas analógicas
- 7: Entradas digitais
- 8: Entradas digitais que podem ser utilizadas como saída PWM
- 9: Referência analógica, pode ser utilizado para setar uma referência externa de tensão (0V a 5V) como limite das entrada analógicas
- 10: Botão reset que apaga qualquer código salvo
- 11: LED indicador se a placa está conectada a uma fonte
- 12: O led Rx indica se o Arduino está recebendo algum dado e o led Tx indica se está transmitindo algum dado
- 13: Circuito integrado
- 14: Regulador de tensão

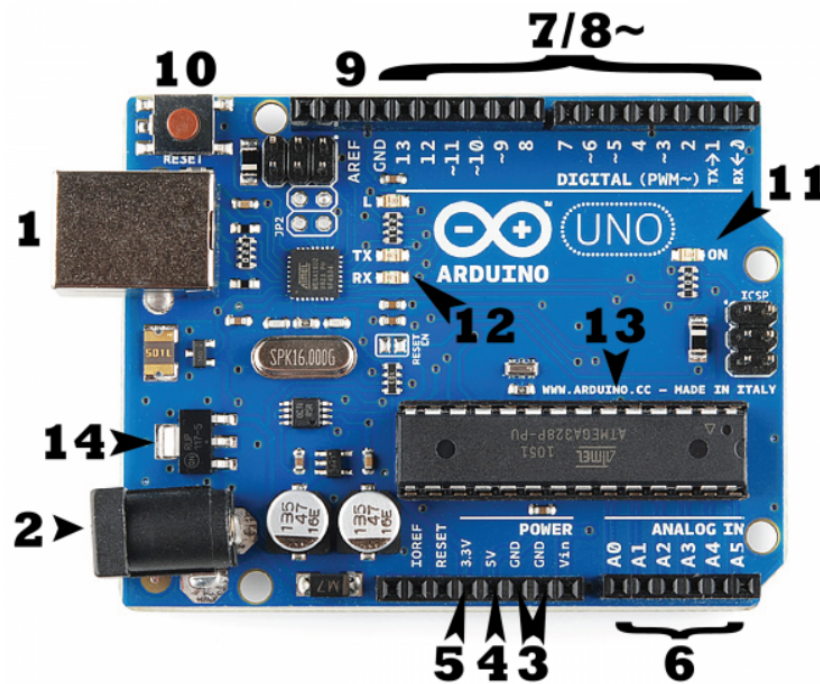


Figura 2.9: Placa Arduino Uno. (MCROBERTS, 2015)

2.4 Power BI

O *Power BI* é uma solução de análise de negócios que permite visualizar dados e compartilhar *insights* em toda a organização, através do aplicativo ou *site*. É possível conectar a centenas de fontes de dados, como o *Excel*, por exemplo, e criar dashboards e relatórios. Um exemplo de relatório criado no software pode ser observado na Fig 2.10. (POWERBI, 2019)

Atualmente, o *software* possui sete versões disponíveis e a gratuita é denominada *Power BI Desktop*, que não possui limite ou restrição de fontes de dados utilizada, além de disponibilizar 10GB de armazenamento total de dados na nuvem, com limitação de 1GB por vez. Com esta versão é possível atualizar os dados do relatório com a base de dados local até oito vezes ao dia, sendo necessário fazer o *download* uma única vez do *gateway* local. A única desvantagem dessa versão é que não é possível compartilhar o relatório com mais de um *login* de acesso, entretanto o relatório pode ser publicado na *web*, mas deve haver precaução e cuidado com os dados comerciais e confidenciais presentes no relatório. (POWERBI, 2019)

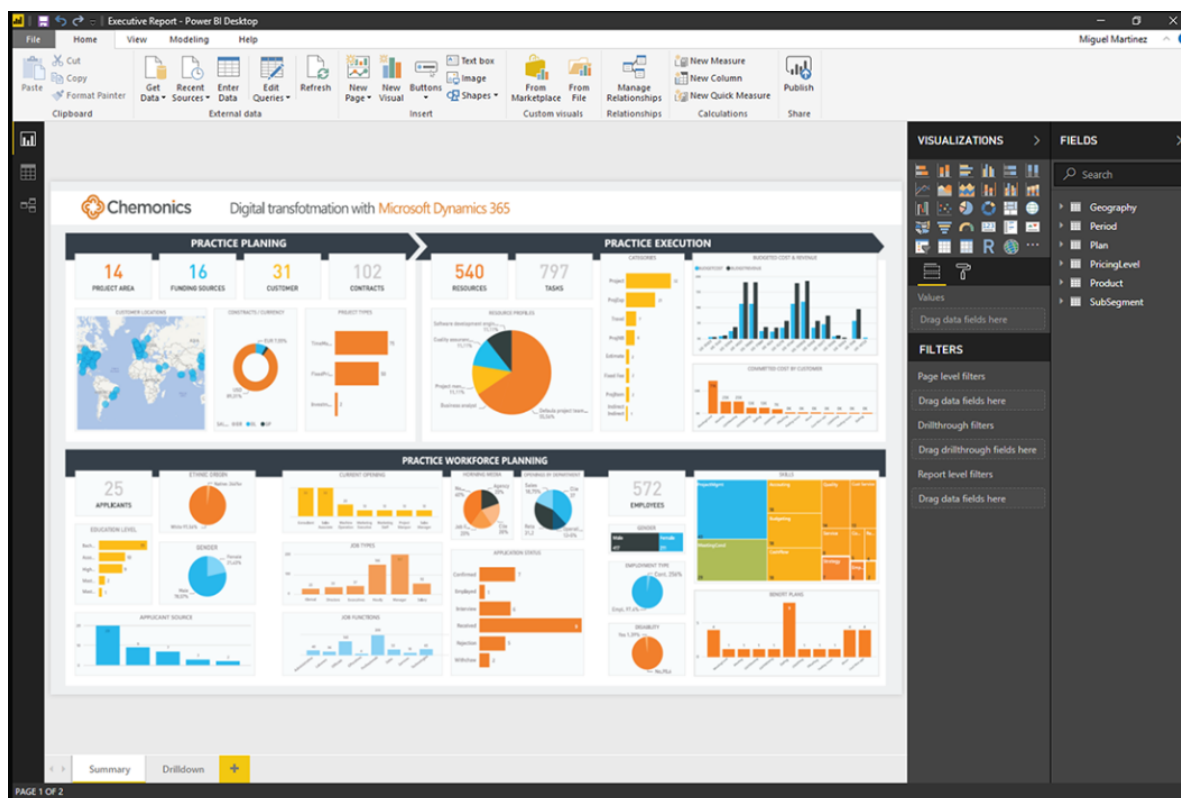


Figura 2.10: Exemplo de relatório criado no *Power BI*. (POWERBI, 2019)

3 METODOLOGIA

Este projeto é dividido em seis etapas que serão abordadas neste capítulo. A Fig. 3.1 traz as etapas estudadas.

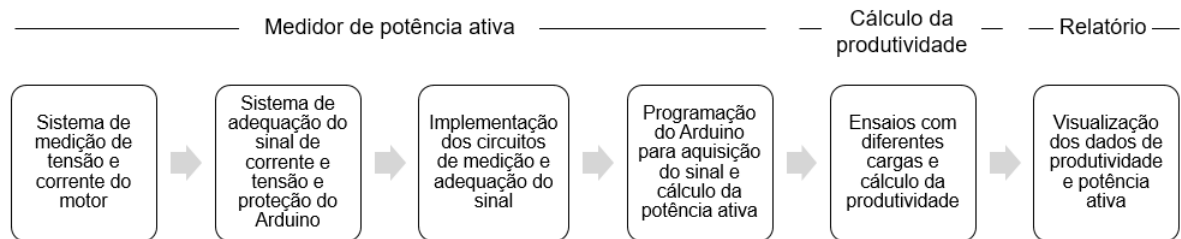


Figura 3.1: Metodologia do projeto

3.1 Sistema de medição de tensão e corrente

Para realizar a medição de tensão e corrente serão utilizados, respectivamente, um transformador de potencial (TP) e um transformador de corrente (TC). A medição de tensão será realizada conectando um transformador com relação de transformação (R_T) de 220V:15V em duas fases do motor, uma vez que a tensão nominal é 220V. A medição de corrente será realizada conectando um transformador com relação de transformação de 300A:5A em uma fase do motor, uma vez que a corrente nominal do motor é de 255A. O diagrama unifilar da ligação realizada pode ser observada na Fig. 3.2 e o diagrama trifásico na Fig. 3.3.

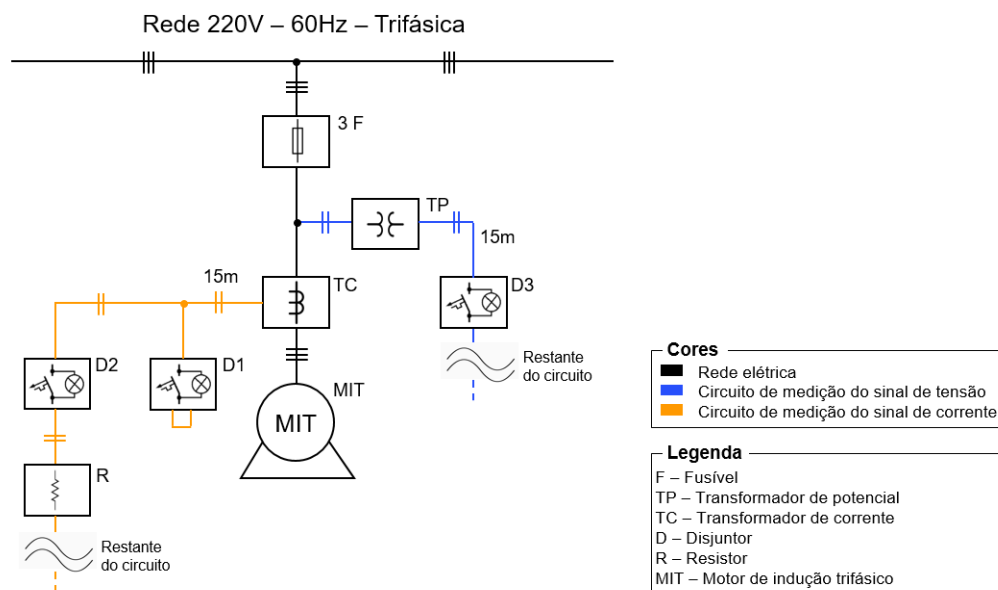


Figura 3.2: Diagrama unifilar da ligação do TC e TP

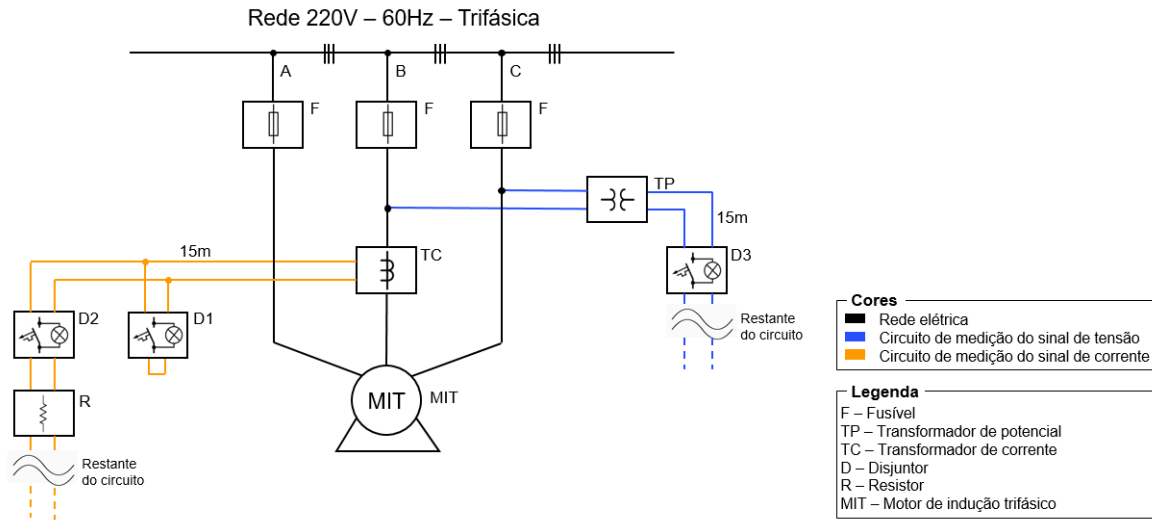


Figura 3.3: Diagrama trifásico da ligação do TC e TP

O TC foi instalado na casa de máquinas e a sua saída foi conectada em um condutor com extensão de 15 metros, até um ambiente em que seja possível instalar os circuitos e aferir os dados. Como o TC está ligando em série com a fase B do motor, realizou-se a instalação de dois disjuntores para que os demais circuitos do projeto possam ser ligados e desligados sem que interfiram no funcionamento do motor nem que o TC seja retirado do circuito. Na entrada do disjuntor 1 está ligado a saída do TC (cuja entrada está ligada na fase B de alimentação do motor) e a sua saída está curto-circuitada. O disjuntor 2 também possui como entrada a saída do TC e a sua saída possui um resistor R de 0,1 Ω , onde é possível realizar a medição do sinal de tensão para a referida corrente. Quando não há medição da tensão a partir do resistor, o disjuntor 2 fica aberto e o disjuntor 1 fica fechado, assim, não é necessário desconectar o TC e o motor continua funcionando sem interrupção. Para realizar a medição, o disjuntor 2 é fechado e o disjuntor 1 é aberto. A equação para cálculo da corrente do motor a partir da saída do TC encontra-se na Eq. (3.1).

$$I_m = \frac{V_{resistor} * R_T}{R} = \frac{V_{out,TC} * 300}{5 * R} = \frac{V_{out,TC} * 300}{0,5} = V_{out,TC} * 600 \quad (3.1)$$

Assim, temos:

$$V_{out,TC} = \frac{I_m}{600} \quad (3.2)$$

O TP foi instalado entre duas fases do motor e a sua saída foi conectada a um condutor com extensão de 15 metros, para que o sinal seja levado para o mesmo ambiente do sinal de saída do TC. A equação para cálculo da tensão do motor a partir da saída do

TP encontra-se na Eq. (3.3).

$$V_m = V_{out,TP} * R_T = \frac{V_{out,TP} * 220}{15} \quad (3.3)$$

Assim, temos:

$$V_{out,TP} = \frac{V_m * 15}{220} \quad (3.4)$$

3.2 Adequação do sinal e proteção do Arduino Uno

Para adequar o sinal de corrente e tensão medido no motor para a entrada do Arduino (que aceita apenas tensão entre 0V e 5V) foi construído um circuito condicionador do sinal analógico. Será utilizado o circuito da Fig. 3.4 para o secundário do TC ($V_{entrada} = V_{out,TC}$), referente à Eq. (3.2) e outro circuito visto na Fig. ?? utilizando como entrada o secundário do TP ($V_{entrada} = V_{out,TP}$), referente à Eq. (3.4). O circuito foi montado e simulado na plataforma LTSpice XVII, que é um *software freeware* que implementa um simulador de circuito eletrônico. Para as simulações abaixo, o sinal $V_{entrada}$ é o sinal do secundário TC utilizado para medição de corrente do motor. Os diodos D1 e D2 são responsáveis pela proteção dos amplificadores operacionais do circuito, que suportam até +15V ou -15V, e neste circuito os diodos são polarizados caso o módulo de $V_{entrada}$ seja maior que 9V. O amplificador operacional U1 é apenas um buffer para isolar o TC do circuito analógico, evitando a queima do circuito analógico em caso de curto-circuito.

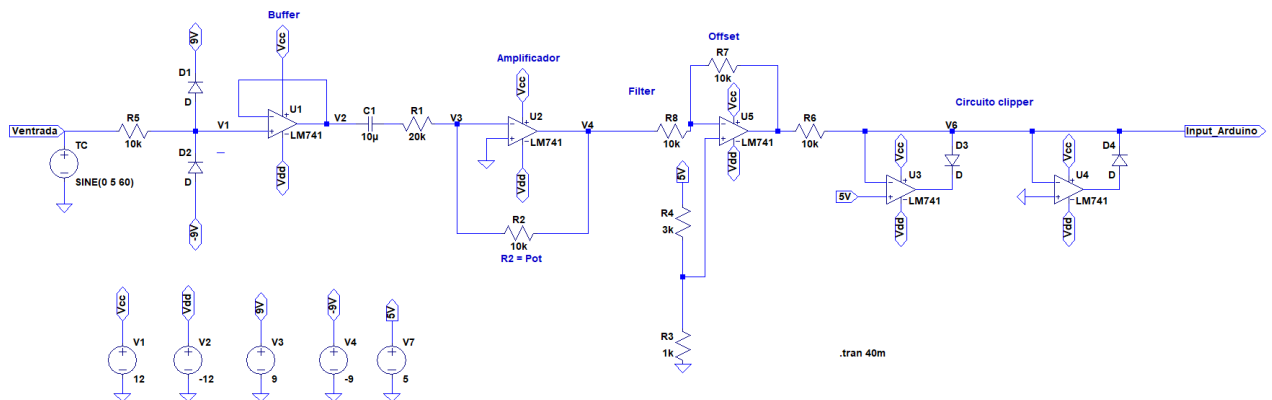


Figura 3.4: Circuito condicionador do sinal de saída do TC

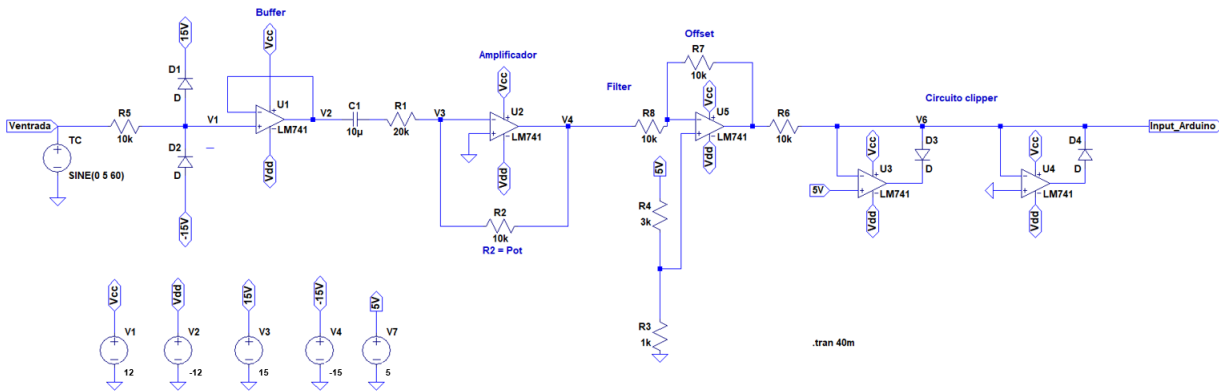


Figura 3.5: Circuito condicionador do sinal de saída do TP

As Figs. 3.6 e 3.7 mostram a simulação do sinal em V2, logo após o buffer, para o caso em que $V_{entrada} = 5V$ e $V_{entrada} = 15V$, respectivamente. Na Fig. 3.6 observamos que o sinal $V(v2)$ é idêntico aos sinais de entrada e proteção dos amplificadores operacionais, isso ocorre pois o sinal de entrada tem o módulo da amplitude menor que 9V e os diodos não estão polarizados. Já na Fig. 3.7 observa-se pela forma de onda de $V(v2)$ que o circuito de proteção dos diodos foi acionado, permitindo passar um sinal com o máximo do módulo da amplitude de 9,7V, que representam 9V da fonte mais 0,7V da polarização do diodo.

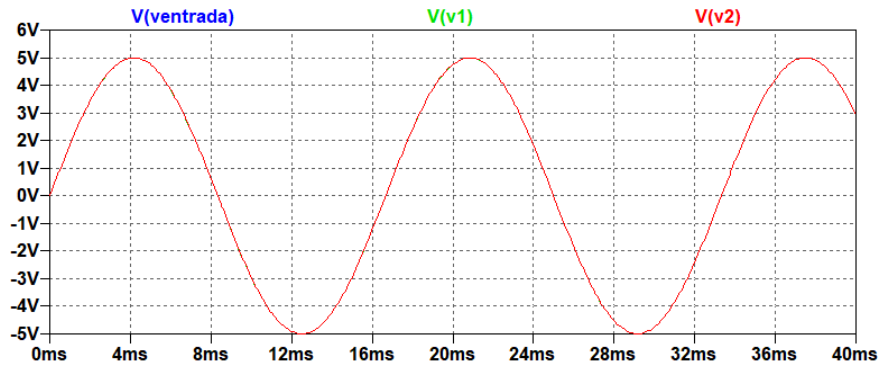


Figura 3.6: Comportamento do sinal após o buffer para $V_{entrada} = 5V$

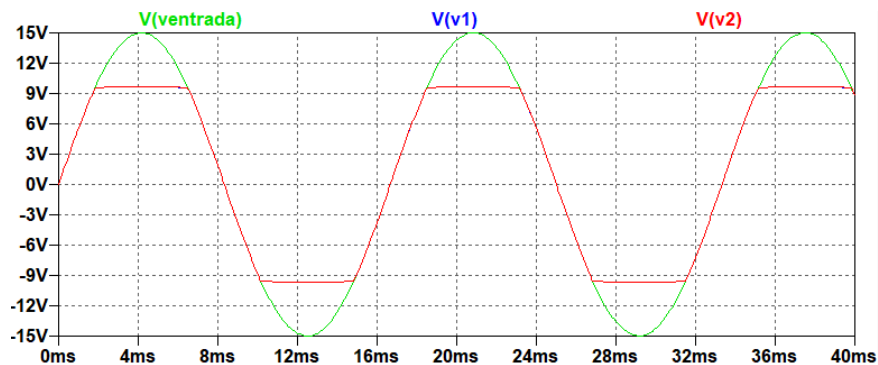


Figura 3.7: Comportamento do sinal após o buffer para $V_{entrada} = 15V$

O dispositivo U2 é um amplificador operacional inversor com a tensão de saída V4 representada pela Eq. (3.5). No circuito que será implementado, R2 será um potenciômetro para que seja possível alterar o ganho de U2 de modo a condicionar adequadamente o sinal de entrada. Porém a para finalidade de simulação, escolheu-se valores fixos para $R_1 = 20k\Omega$ e $R_2 = 10k\Omega$. As Figs. 3.8 e 3.9 exibem o sinal V4 simulado após a ação de U2, para o caso em que $V_{entrada} = 5V$ e $V_{entrada} = 15V$, respectivamente. Observa-se que na Fig. 3.8 o sinal V2 tem amplitude 10Vpp e o sinal V4 tem amplitude 5Vpp, confirmando o ganho 1/2 encontrado a partir da Eq. (3.5). O mesmo acontece com a Fig. 3.9, onde V2 tem amplitude 19,4Vpp e V4 9,7Vpp. Vale lembrar que como o amplificador operacional utilizado é inversor, a fase da tensão V4 é invertida se comparada com a fase da tensão V2.

$$V4 = V2 \frac{R_2}{R_1} = \frac{V2}{2} \quad (3.5)$$

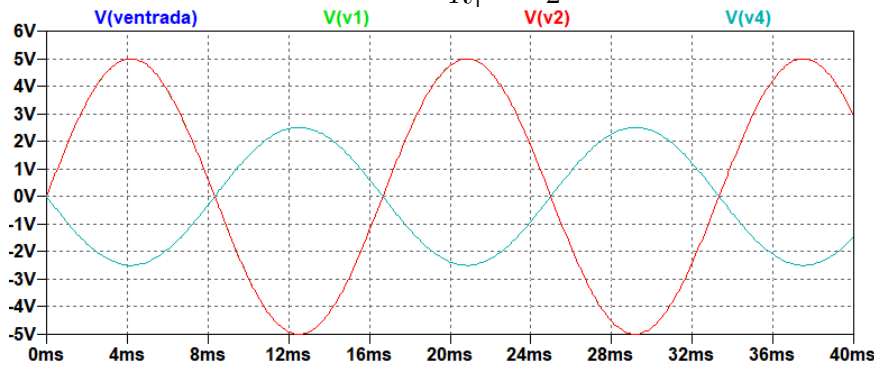


Figura 3.8: Sinal de saída V4 do amplificador operacional U2 para $V_{entrada} = 5V$

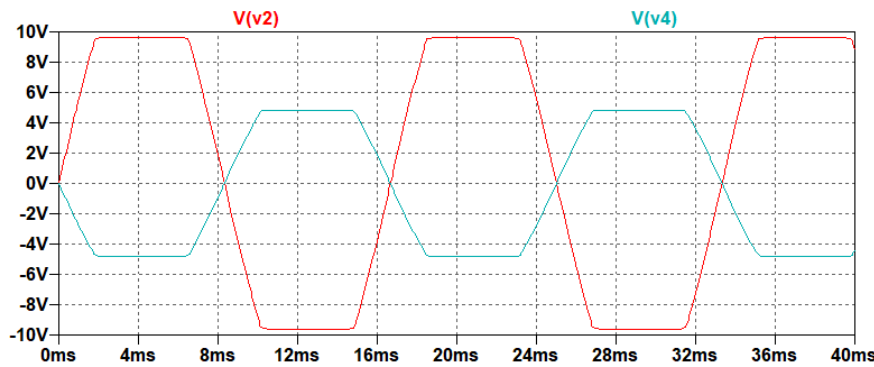


Figura 3.9: Sinal de saída V4 do amplificador operacional U2 para $V_{entrada} = 15V$

Em seguida, os resistores R_3 e R_4 são um divisor de tensão que tem função de acrescentar um offset de 2,5V no sinal. Este offset é importante pois a entrada do Arduino suporta tensões entre 0V e 5V, sendo necessário adequar o sinal de entrada para que não ultrapasse esses limites, portanto a forma de onda será centrada em 2,5V para não danificar o Arduino.

O último bloco do circuito é um circuito clipper positivo e negativo para garantir que será retirado do sinal qualquer valor acima de 5V e abaixo de 0V, que são a máxima e a mínima tensão suportada pelo Arduino. As Figs. 3.10 e 3.11 mostram o sinal simulado que será aplicado ao Arduino para o caso em que $V_{entrada} = 5V$ e $V_{entrada} = 15V$, respectivamente. Observa-se que ambos os sinais de saída do circuito possuem um offset de 2,5V e não ultrapassam o valor máximo de 5V e o mínimo de 0V.

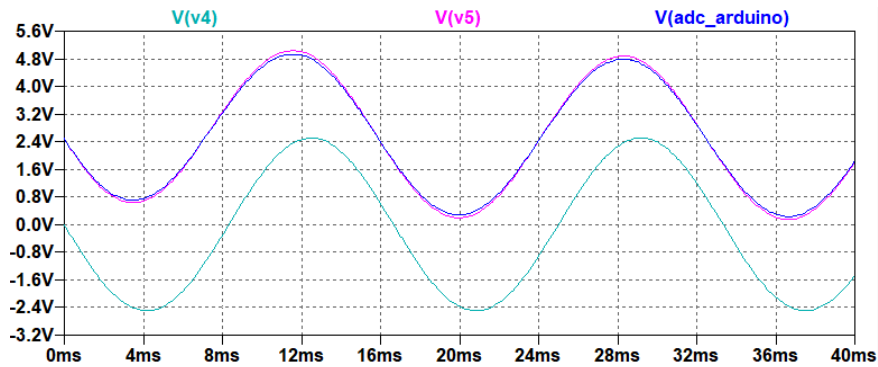


Figura 3.10: Sinal de entrada do Arduino para $V_{entrada} = 5V$

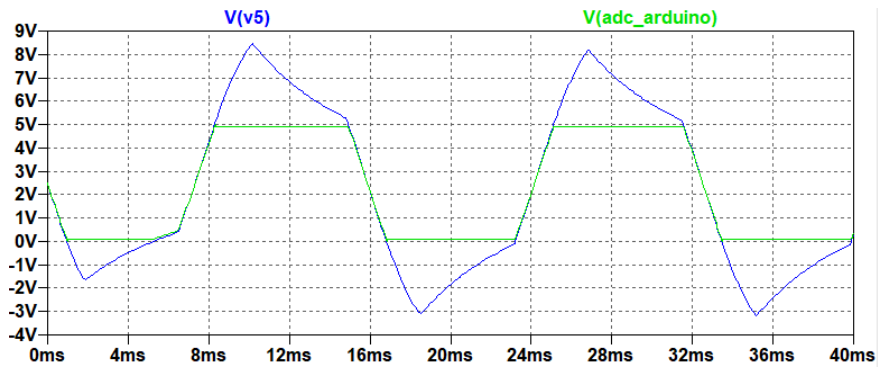


Figura 3.11: Sinal de entrada do Arduino para $V_{entrada} = 15V$

3.3 Implementação dos circuitos

A configuração da junção dos circuitos mencionados nas seções anteriores pode ser observada no diagrama unifilar representado na Fig. 3.12 e pelo diagrama trifásico representado na Fig. 3.13. A fonte DC utilizada será uma fonte de computador.

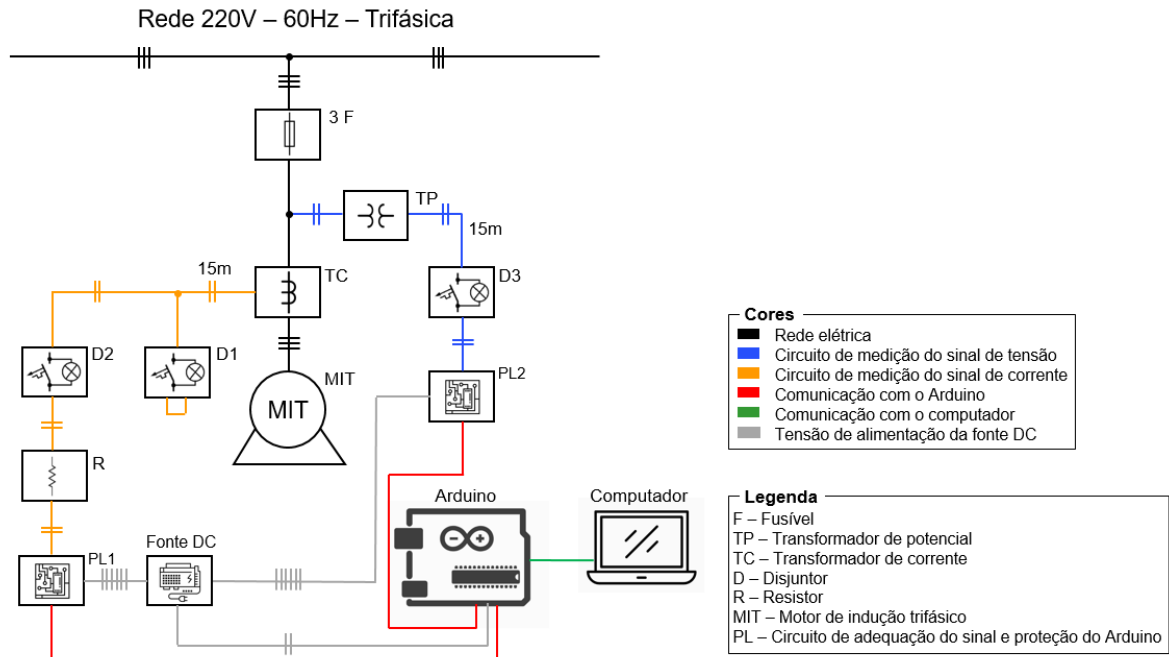


Figura 3.12: Diagrama unifilar do circuito medidor de potência ativa

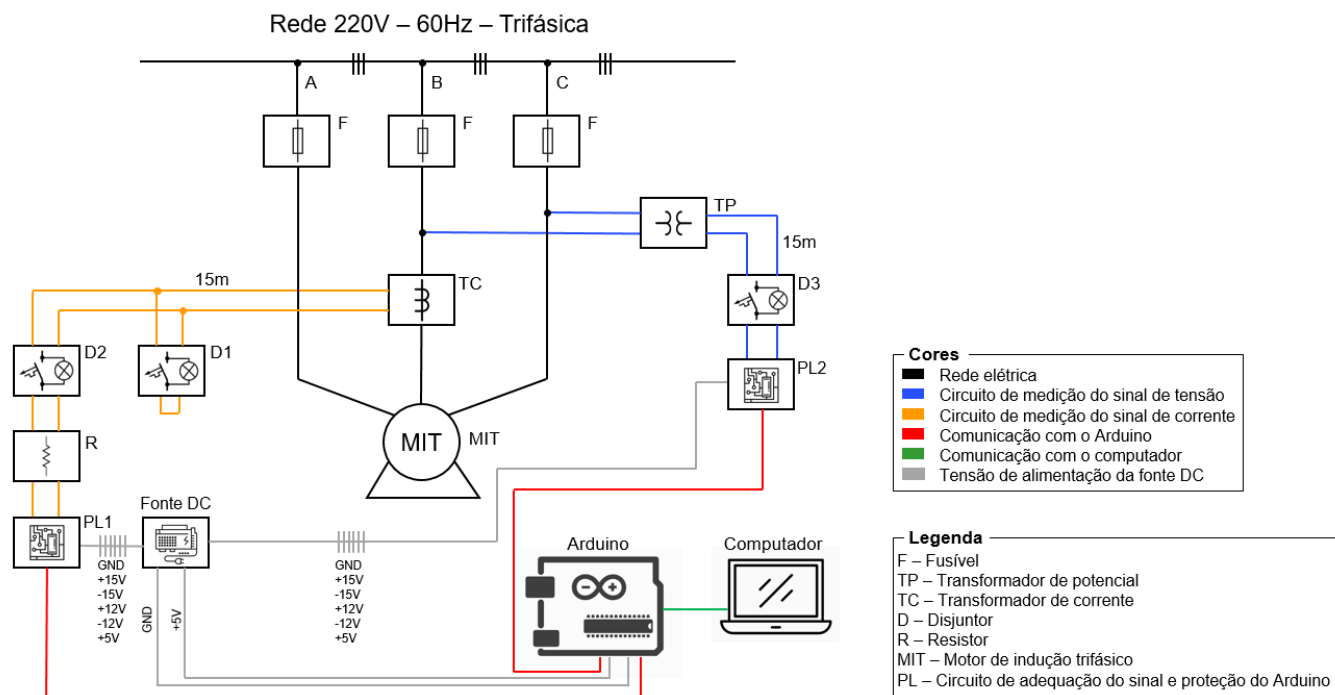


Figura 3.13: Diagrama trifásico do circuito medidor de potência ativa

O circuito de medição de corrente e tensão podem ser analisados em detalhes pelas etapas da Fig. 3.14 e Fig. 3.15, respectivamente. As caixas com fundo branco representam os elementos do processo e as caixas em cinza representam a manipulação algébrica que

ocorre com a corrente I_m e tensão V_m do motor até chegar no computador. Segue uma explicação sobre cada passo da manipulação algébrica:

- Passo 1: Corrente e tensão de entrada do TC e TP, provenientes do motor;
- Passo 2: Corrente e tensão de saída do TC e TP, após o cálculo da relação de transformação;
- Passo 3: Tensão no resistor conectado à saída do TC;
- Passo 4: Tensão de entrada do Arduino com offset de 2,5V e ganho G;
- Passo 5: Tensão de saída do conversor A/D de 10 bits do Arduino, com amostras entre 0 e 1023, que são equivalentes ao *range* de 0V a 5V.

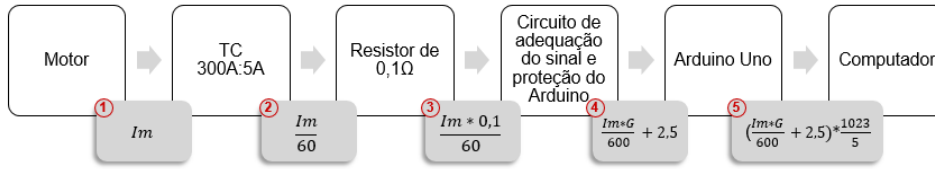


Figura 3.14: Etapas da medição de corrente do motor

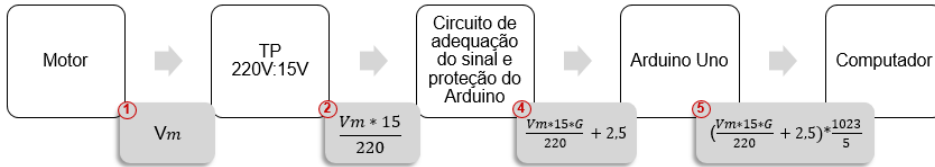


Figura 3.15: Etapas da medição de tensão do motor

Portanto, para obter a corrente e tensão do motor a partir dos valores amostrados do Arduino deve-se utilizar as Eqs. (3.6) e (3.7).

$$I_m = (Arduino_{out,I} * \frac{5}{1023} - 2,5) * \frac{600}{G} \quad (3.6)$$

$$V_m = (Arduino_{out,V} * \frac{5}{1023} - 2,5) * \frac{220}{15 * G} \quad (3.7)$$

Considerando a retirada do *offset* de 2,5V e ganho $G=1$, temos as equações de adequação algébricas a seguir:

$$I_m = (Arduino_{out,I} * \frac{5}{1023}) * \frac{600}{G} = Arduino_{out,I} * 2,933 \quad (3.8)$$

$$V_m = (Arduino_{out,V} * \frac{5}{1023}) * \frac{220}{15 * G} = Arduino_{out,V} * 0,072 \quad (3.9)$$

3.4 Programação do Arduino Uno para aquisição do sinal e realização dos cálculos

Para cumprir com o objetivo de amostrar o sinal de tensão e corrente e realizar o cálculo da potência ativa, o programa desenvolvido no Arduino contém três rotinas principais: configuração, interrupção 1 e interrupção 2. Uma interrupção é um sinal que interrompe o que o processador está executando no momento para executar uma outra função distinta. A interrupção pode ser acionada através de um sinal externo (como pressionar um botão) ou de um sinal interno (como um temporizador ou um sinal de *software*). Quando a rotina de interrupção é acionada o processador executa as funções da respectiva rotina, e ao finalizar o processador volta a executar a rotina que estava acionada antes da interrupção. O programa desenvolvido pode ser observado no Apêndice [A](#).

3.4.1 Rotina de configurações

A rotina inicial de configuração tem por objetivo configurar os *timers* utilizados, os pinos que serão utilizados como entrada e a inicialização da porta serial. Segue na Fig. [3.16](#) o fluxograma que representa o programa desenvolvido.

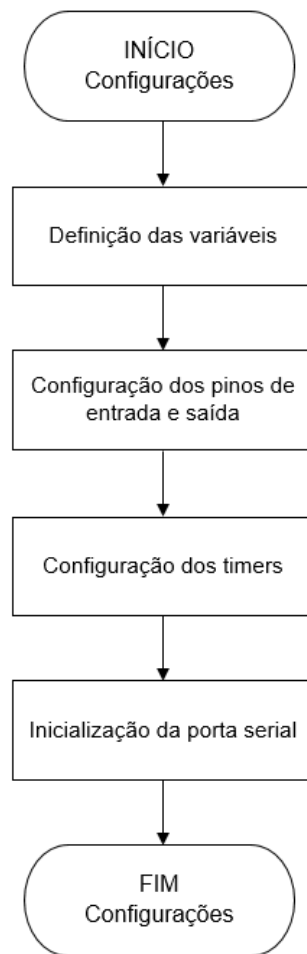


Figura 3.16: Fluxograma da rotina de configuração

3.4.2 Rotina de Interrupção 1: Cálculo da potência ativa

A rotina de interrupção 1 tem três objetivos: calcular o valor da corrente e tensão no motor a partir do sinal amostrado, calcular a potência ativa, corrente e tensão RMS e potência aparente e enviar os dados de data, hora e potência ativa para o *Excel*. A interrupção 1 ocorre a uma frequência de 5Hz, assim, a cada 200ms ocorre o cálculo da potência ativa do motor com os pontos amostrados na interrupção 2. Utilizou-se um *timer* que já possui uma biblioteca pronta no Arduino. Segue na Fig. 3.17 o raciocínio desenvolvido para esta interrupção.

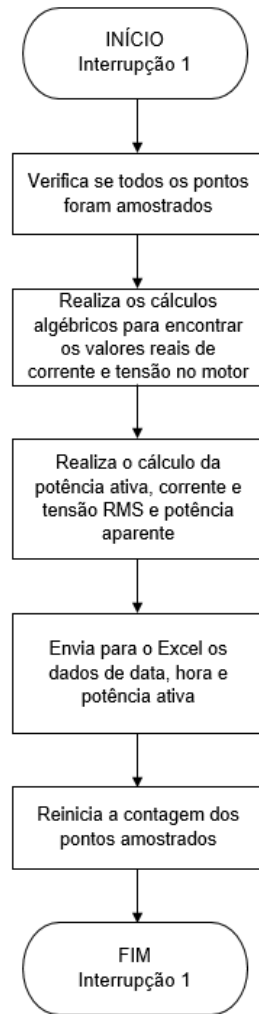


Figura 3.17: Fluxograma da rotina de interrupção 1

As Eqs. (3.8) e (3.9) apresentam o fator algébrico utilizado para calcular a corrente e tensão no motor. Este fator algébrico foi escolhido pois o valor de *offset* será retirado através de um filtro passa-baixa e o ganho escolhido foi unitário.

Estudou-se dois métodos para o cálculo da corrente e tensão RMS e da potência ativa. A primeira metodologia abordada foi o cálculo da FFT (transformada rápida de Fourier) afim de obter a amplitude e a fase dos sinais de corrente e tensão, para calcular, respectivamente, o valor de corrente e tensão e o fator de potência, para então calcular a potência ativa. A FFT será primeiramente implementada no *software* Matlab através da função existente *fft* e se comprovada como melhor método será implementada no Arduino. A segunda metodologia estudada foi o cálculo a partir das equações para tempo discreto da Seção 2.1.3, e será implementada diretamente no Arduino.

Uma vez que a empresa é situada em uma zona rural e o acesso à *internet* é em algumas vezes limitado e instável foi decidido não utilizar a *internet* para enviar os dados do Arduino para o computador. Portanto, o envio dos dados para um arquivo

Excel será realizado através do cabo de comunicação entre o Arduino e o computador, e a escrita dos dados no arquivo *Excel* será realizada com a ajuda do *software open source* PLX-DAQ, que realiza a comunicação entre o Arduino e o *Excel*, escrevendo os dados enviados pelo Arduino em colunas no arquivo *Excel* (PARALLAX, 2014). Segue na Fig. 3.18 a interface do *software* que será utilizada. Para o uso adequado do *software*, deve-se inserir as informações corretas do campo "Port" e "Baud", que são, respectivamente, a porta de comunicação do Arduino com o computador, que para este projeto é o Port 7, e a taxa de transmissão de dados, que para este projeto é 9600.



Figura 3.18: Interface do software PLX-DAQ

3.4.3 Rotina de Interrupção 2: Amostragem dos sinais de corrente e tensão

A interrupção 2 tem três objetivos: ler os sinais de entrada do Arduino (amostragem), calcular e retirar o valor do *offset* aplicado no sinal e filtrar os sinais para utilizar os dados apenas da frequência fundamental de 60Hz. Segue na Fig. 3.19 o fluxograma das atividades da interrupção 2.

Escolheu-se a amostragem de 32 pontos por ciclo, resultando em uma frequência de amostragem de 1920Hz. Para realização dos cálculos será utilizado três ciclos, portanto, a cada rotina de interrupção 2, serão amostrados 96 pontos de corrente e tensão.

O cálculo do valor do *offset* foi realizado utilizando um filtro passa-baixa (FPB) e utilizou-se como referência o filtro desenvolvido no projeto "*Open Energy Monitor*". Como este filtro tem um tempo para convergir superior aos 200ms da interrupção 1, escolheu-se iniciar o filtro com um valor próximo de 2,5V, que deveria ser o *offset* aplicado ao circuito (valor 512 para um conversor de 10 bits), pois aumentar o tempo de conversão resultaria em um sinal com muito ripple. (OPENENERGY, 2019)

Para realizar os cálculos apenas com o valor da frequência fundamental de 60Hz da corrente, utilizou-se um filtro IIR (filtro digital com resposta ao impulso com duração infinita) passa-baixa (FPB), cujos coeficientes foram calculados através do *Python*, onde foi inserido o valor da banda de passagem de 80Hz, o valor da banda de rejeição de 120Hz,

a frequência de amostragem de 1920Hz e o ganho unitário, e a função retornou os valores dos coeficientes do filtro a ser implementado. O filtro projetado é Butterworth de quarta ordem e as Eqs. (3.10) e (3.11) trazem os coeficientes que serão utilizados. A função utilizada pode ser observada na Fig. 3.20, obtida através do uso do *Jupyter Notebook*, um ambiente computacional *web* que permite a criação de documentos. As linhas verticais vermelhas representam as frequências de 80Hz e 120Hz. É importante ressaltar que tanto o sinal de tensão e corrente devem ser filtrados, para não haver divergências posteriores entre os sinais.

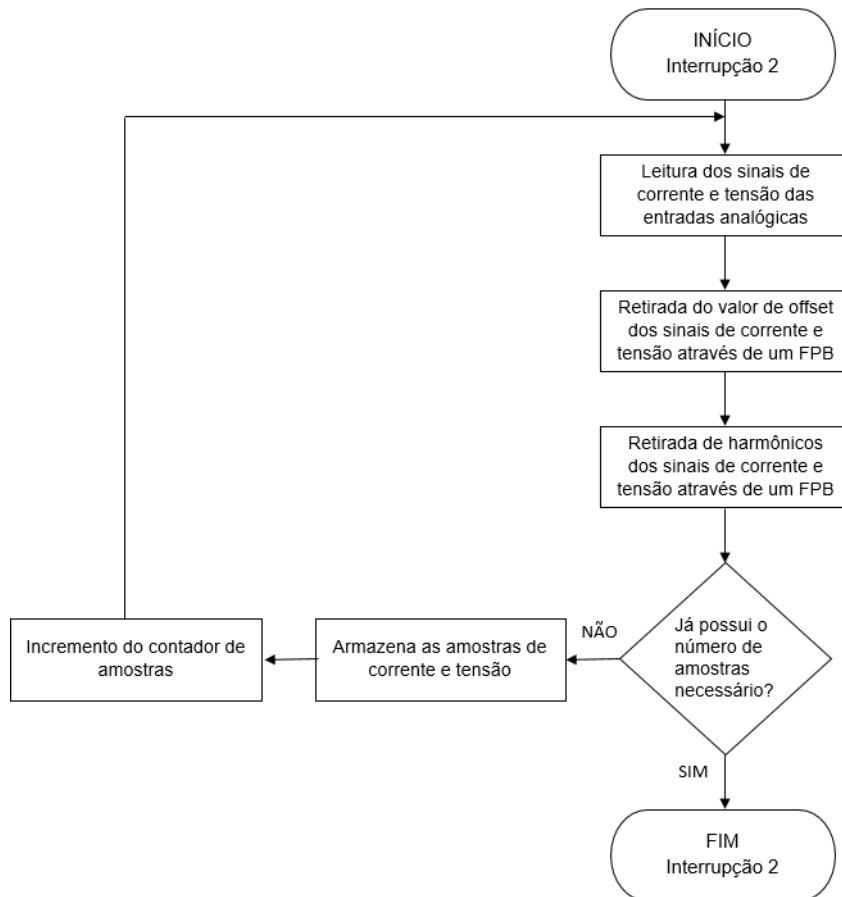


Figura 3.19: Fluxograma da rotina de interrupção 2

$$coefB = [0.0381, -0.0327, -0.0327, 0.0380] \quad (3.10)$$

$$coefA = [1, -2.6960, 2.4827, -0.7761] \quad (3.11)$$

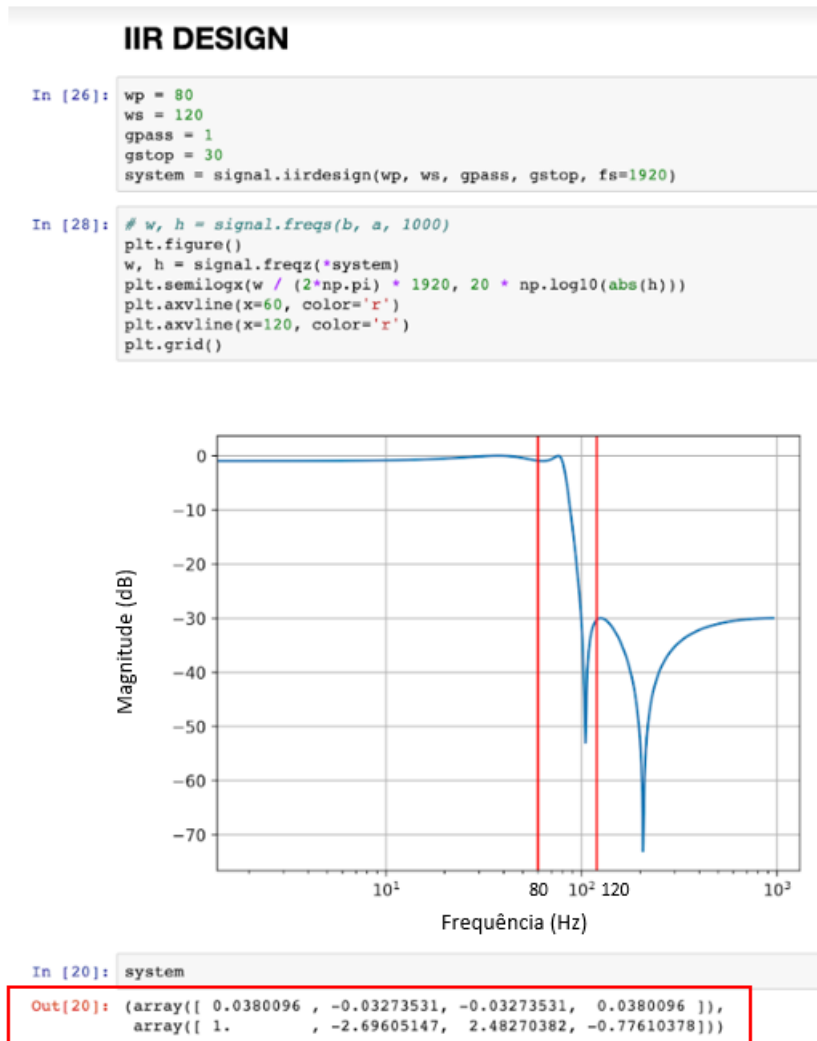


Figura 3.20: Coeficientes do filtro de rejeição de harmônicos calculado no Python

3.5 Ensaios com diferentes cargas

3.5.1 Britador de mandíbulas

O britador de mandíbulas é um equipamento utilizado para fazer a britagem de minérios de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho. O esquemático do britador primário da Pedreira Santa Cornélia pode ser observado na Fig. 3.21. Onde H1 é a altura total da câmara, H2 é a altura útil da câmara, W1 é a maior largura do britador, onde ocorre a alimentação e W2 é a menor largura do britador, onde ocorre a saída das pedras após a britagem primária. Sua composição é uma mandíbula fixa e uma móvel ligada ao excêntrico, que promove o movimento de aproximação e afastamento entre as mandíbulas e garante a britagem do material. O movimento da mandíbula para este projeto ocorre através de um motor de indução trifásico (FIGUEIRA, 2010).

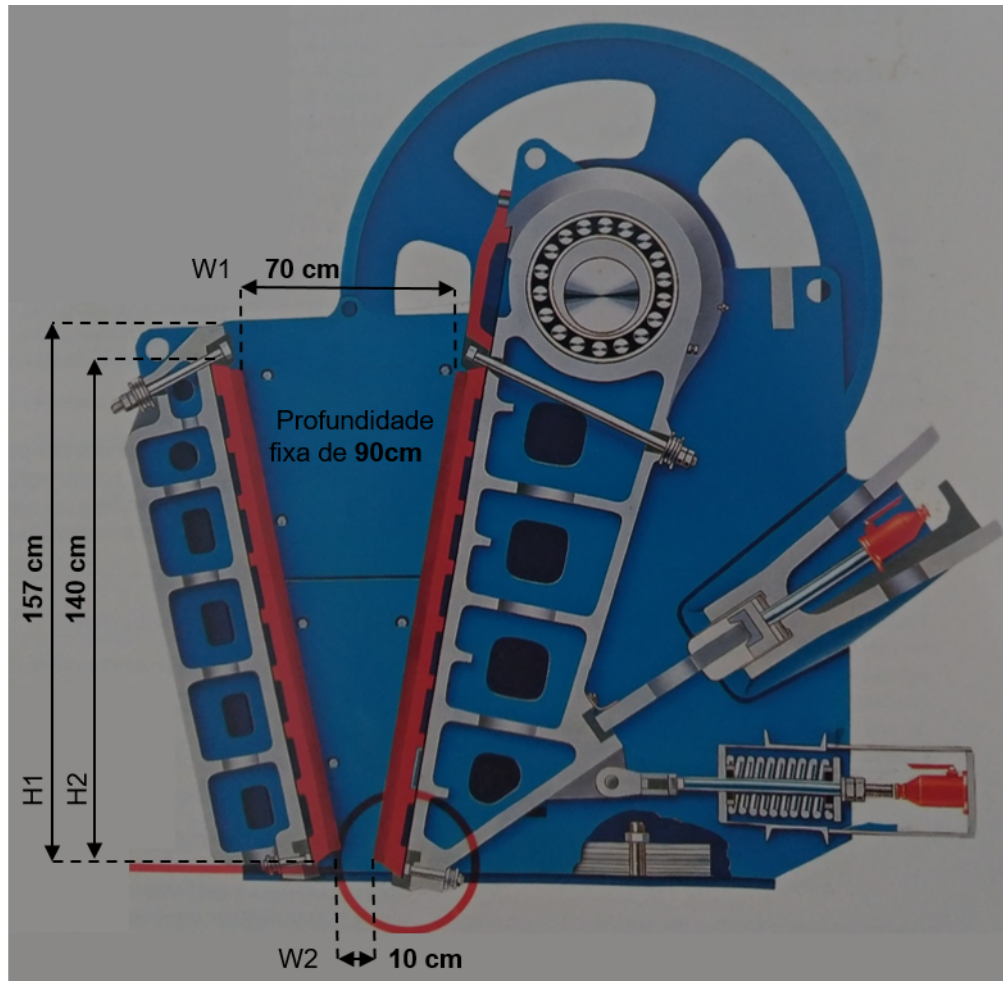


Figura 3.21: Desenho esquemático do britador da Pedreira Santa Cornélia (JAWMASTER, 1997)

A câmara do britador se assemelha a um prisma pentagonal, o qual pode ser observado na Fig. 3.22. Assim, o volume da câmara pode ser calculado através da fórmula do volume do prisma pentagonal, que encontra-se na Eq. (3.12). Para calcular o volume da câmara, utiliza-se a semelhança de triângulo mostrada na Fig. 3.23. Para calcular o volume da câmara considerando a altura útil e a metade da altura útil, deve-se calcular, respectivamente os valores de $W3$ e $W4$, como mostra as Eqs. (3.13) e (3.14). Posteriormente, aplica-se a Eq. (3.12) e encontra-se o volume total útil e o volume considerando uma altura de 70cm que são $0,46307 \text{ m}^3$ e $0,14727 \text{ m}^3$, respectivamente, conforme as Eqs. (3.15) e (3.16). Portanto, concluímos que o volume para metade da altura útil representa 32% do volume útil da câmara, conforme a Eq. (3.17).

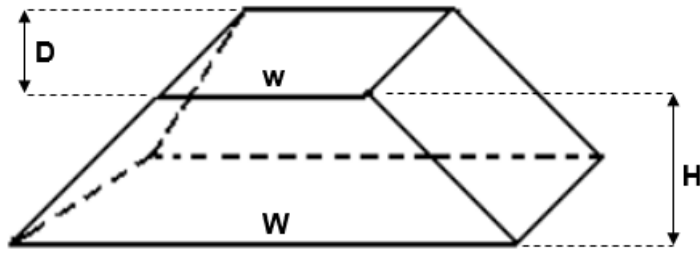


Figura 3.22: Prisma pentagonal

$$Volume = \frac{W + w}{2} H * D \quad (3.12)$$

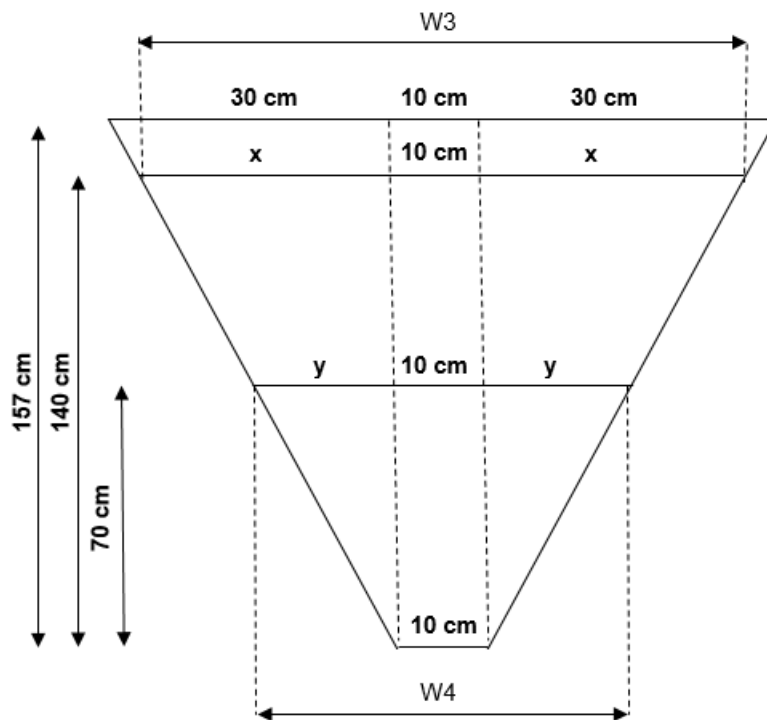


Figura 3.23: Semelhança de triângulo para cálculo do volume da câmara

$$W3 = 2 * \frac{30 * 140}{157} + 10 = 63,5cm \quad (3.13)$$

$$W4 = 2 * \frac{30 * 70}{157} + 10 = 36,75cm \quad (3.14)$$

$$Volume_{total} = \frac{W3 + W2}{2} H2 * D = \frac{63,5 + 10}{2} 140 * 90 = 463070,1 cm^3 = 0,46307 m^3 \quad (3.15)$$

$$Volume_{h/2} = \frac{W4 + W2}{2} * \left(\frac{H2}{2}\right) * D = \frac{36,75 + 10}{2} * \left(\frac{140}{2}\right) * 90 = 147267,5 cm^3 = 0,14727 m^3 \quad (3.16)$$

$$Relação\ de\ volume = \frac{0,14727}{0,46307} = 32\% \quad (3.17)$$

3.5.2 Ensaios

Após a montagem do circuito da Fig. 3.13 é necessário realizar os testes com diferentes cargas com a finalidade de conhecer o comportamento da corrente e tensão, e então calcular a potência ativa e correlacioná-la com a produtividade. Os testes serão realizados com três cargas: com o motor em vazio (câmara do britador primário vazia), com o motor operando com a carga ocupando metade da altura útil da câmara e com o motor operando com 100% da carga, ou seja, com a câmara do britador primário com 100% da sua capacidade (até a altura útil da câmara).

Assume-se uma relação entre o volume da câmara preenchido com pedra e a produtividade. Assim, a câmara totalmente cheia representa uma produtividade de 100%, a câmara com metade da sua altura útil preenchida representa 32% da produtividade (pois representa 32% do volume, como mostra a Eq. (3.16) e a câmara vazia representa uma produtividade de 0%.

Para cada carga realiza-se vinte testes e calcula-se a média da potência do motor destes testes e com este parâmetro pode-se realizar o cálculo da produtividade. Será correlacionado uma produtividade de 100% com a média da potência ativa dos testes de 100% de carga e analogamente, uma produtividade de 32% com a média da potência ativa com 32% da carga e uma produtividade de 0% com a média da potência ativa do motor em vazio. Os dados de potência ativa P1, P2 e P3 que serão obtidos a partir do ensaio com diferentes cargas pode ser visto na Tab. 3.1. Com os dados de P1, P2 e P3 pode-se traçar uma curva que relaciona a altura de pedras na câmara do britador e potência ativa do motor, de modo a calcular a produtividade através da Eq. (3.18) para qualquer valor de altura de pedras. Vale lembrar que obter apenas três pontos de potência ativa não é o ideal, porém como a determinação do volume de pedras é a olho nu, é muito difícil garantir algum outro valor de altura, principalmente porque as pedras não possuem padrão em tamanho e formato, além de que a visualização é realizada a uma distância de 5 metros da

câmara do britador.

$$Relação\ de\ volume = Produtividade = \frac{60h^2 + 20 * 157 * h}{157 * 73,5 * 140} \quad (3.18)$$

Tabela 3.1: Dados esperados após o ensaio com diferentes cargas

Carga	Produtividade	Altura das pedras (cm)	Média da potência ativa (kW)
Vazio	0%	0	P1
32% da carga	32%	70	P2
100% da carga	100%	140	P3

3.6 Visualização dos dados de produtividade

A interface de visualização dos dados tem a finalidade de apresentar dados de produtividade e potência ativa do motor do britador primário. Os dados de data, hora e potência ativa calculada pelo Arduino são enviados a cada $200ms$ para um arquivo da *MS Excel*, onde será calculado a produtividade.

Para criar um relatório/painel de controle para a visualização da produtividade e da potência ativa será utilizado o *software MS Power BI Desktop*. A porposta de interface de visualização de dados pode ser observada na Fig. 3.24. Os dados que serão exibidos serão a média da produtividade por hora, a média da produtividade por minuto e a média da potência ativa por minuto. Será possível realizar o filtro de data e horário desejado.

A versão *MS Power BI Desktop*, que é gratuita, permite que os dados no painel de controle sejam atualizados com os dados inseridos no arquivo *Excel* até oito vezes ao dia. Uma vez que a produção tem início às 7:12h e encerra às 17:00h, a atualização dos dados ocorrerá todos os dias a cada uma hora e trinta minutos, com início às 7:00h e finalização às 17:30. A conta de acesso criada no *Power BI* para realização deste trabalho foi com o *e-mail* USP.

PRODUTIVIDADE DO BRITADOR PRIMÁRIO

Período: De: / / a: / /

Produtividade: %

Gráfico da média da produtividade por hora

Gráfico da média da produtividade por minuto

Gráfico da média da potência ativa por minuto

Figura 3.24: Proposta da interface de visualização dos dados

4 RESULTADOS

4.1 Sistema de medição de tensão e corrente

Na Fig. 4.1 pode ser observado a ligação prática realizada para o transformador de corrente para realizar os ensaios. Após a instalação do TC, aferiu-se as formas de onda da saída do TC, com o auxílio de um osciloscópio, para o motor em vazio e com carga, conforme a Fig. 4.2. Verifica-se que há a presença de harmônico no sinal, visível principalmente no sinal sem carga, o que não era esperado. Com a presença deste harmônico há um aumento nas perdas no ferro e no cobre do motor, afetando a sua eficiência e o torque disponível.

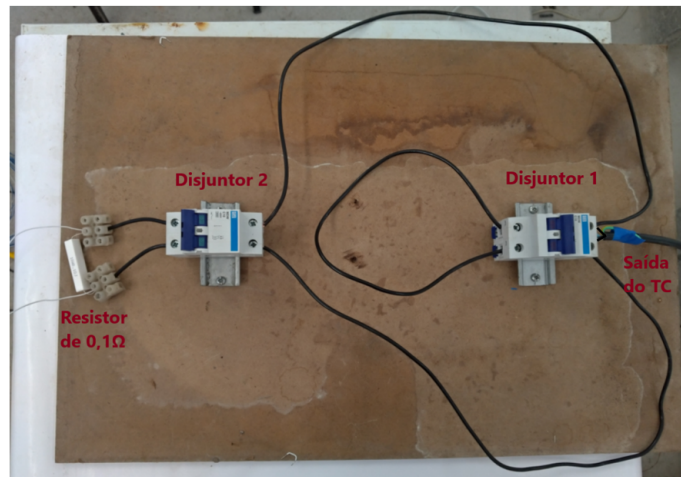


Figura 4.1: Circuito de instalação do TC para realização dos ensaios

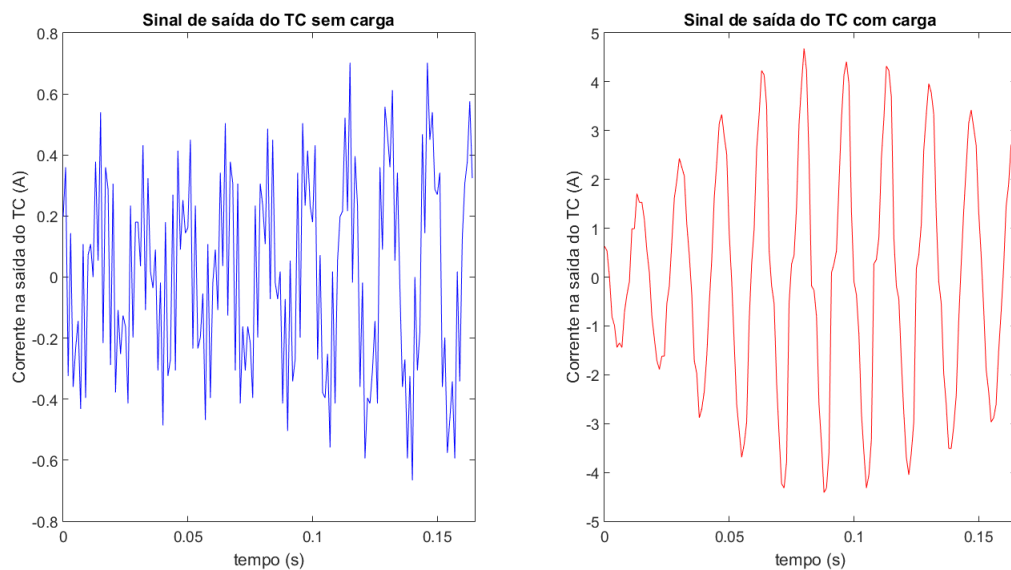


Figura 4.2: Sinal de saída do TC com o motor em vazio e com carga para $R = 0,1\Omega$

Após a instalação do TP, também ocorreu a aferição das formas de onda da saída do TP, com o auxílio de um osciloscópio, para o motor em vazio e com carga, conforme a Fig. 4.3. A saída de tensão encontra-se dentro do esperado, sem alteração significativa de amplitude com e sem carga.

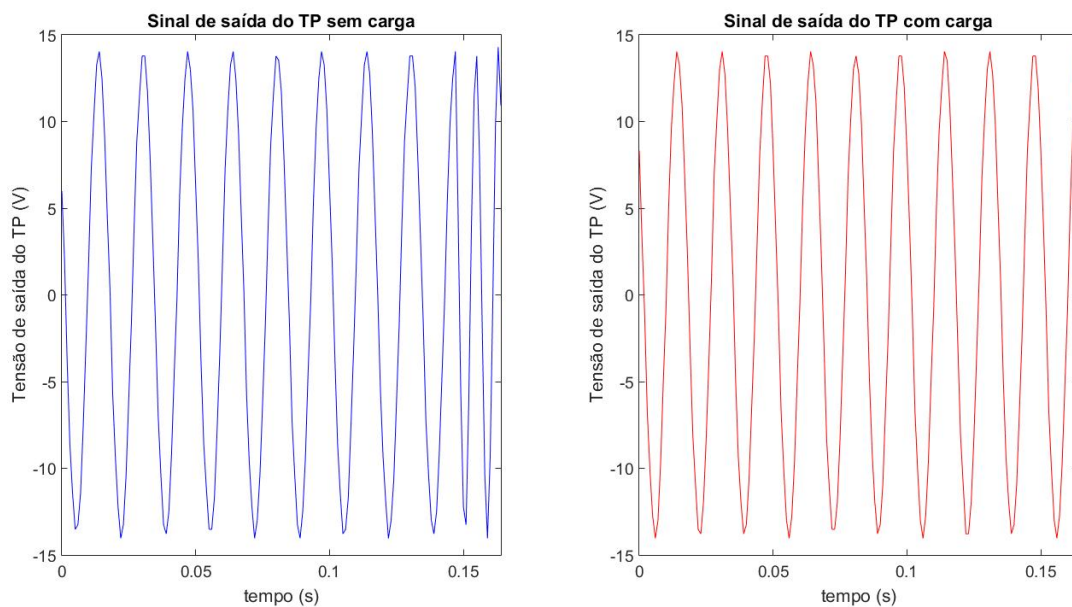


Figura 4.3: Sinal de saída do TP com o motor em vazio e com carga

4.2 Implementação dos circuitos

Segue na Fig. 4.4 a implementação do circuito projetado para adequação do sinal e proteção do Arduino UNO. O item 1 indicado na figura é um jump para escolher se o sinal de entrada será proveniente de fios ou de uma entrada do tipo P2. O item 2 da figura é um jump para escolher o ganho que o sinal terá, que pode variar entre 1, 2,5, 3 e 5 e para a realização dos ensaios escolheu-se o ganho 1. Montou-se dois circuitos idênticos para a utilização na saída do TC e outro do TP.

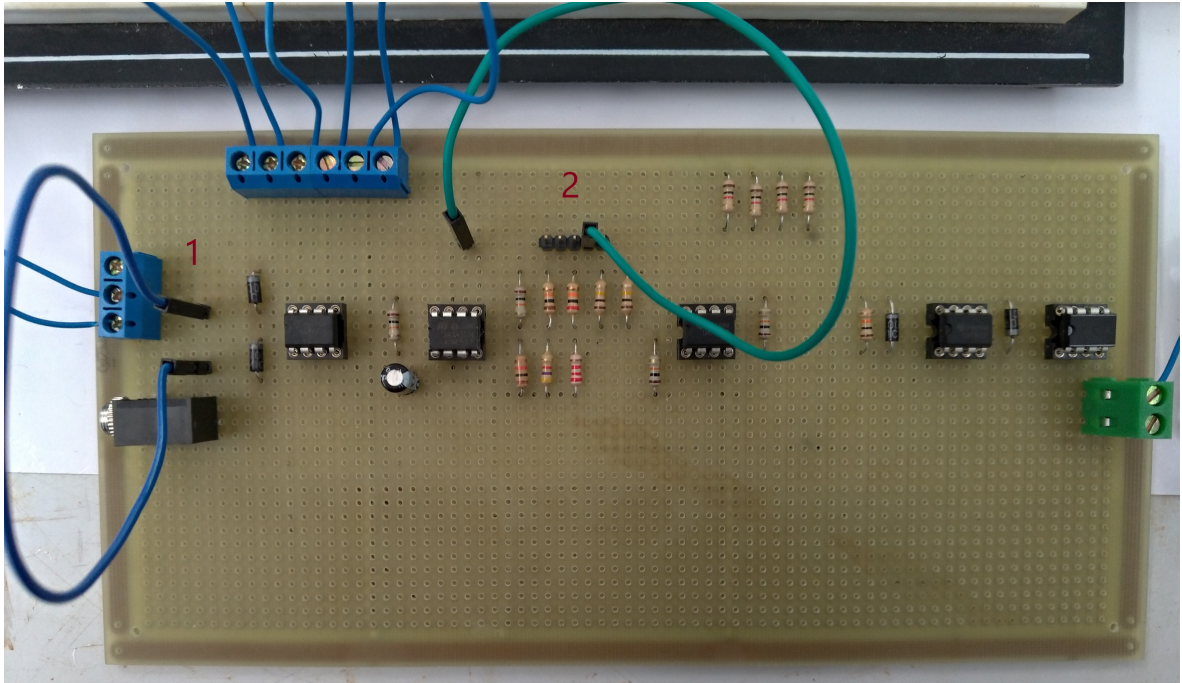


Figura 4.4: Circuito de adequação do sinal e proteção do Arduino

O conjunto implementado para realizar os testes pode ser visto na Fig. 4.5. O circuito montado conta com ligações preliminares, como, por exemplo, a fonte montada em um protoboard, que será substituída por uma fonte de computador. Entretanto, a montagem realizada é capaz de prover os dados necessários para a realização dos testes. O circuito final foi montado em um painel adequado, como mostra as Figs. 4.6 e 4.7.

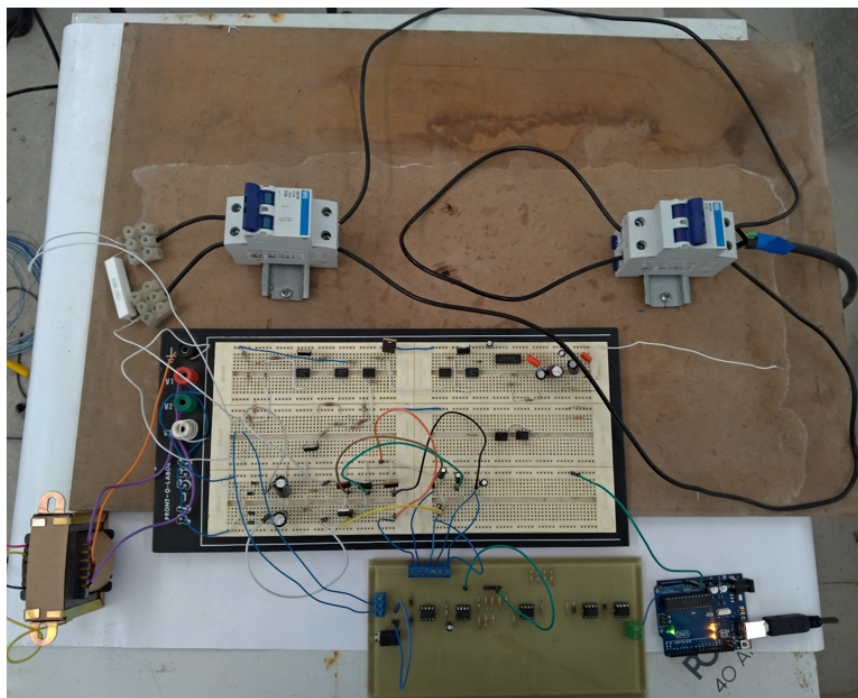


Figura 4.5: Circuito implementado para realização de testes

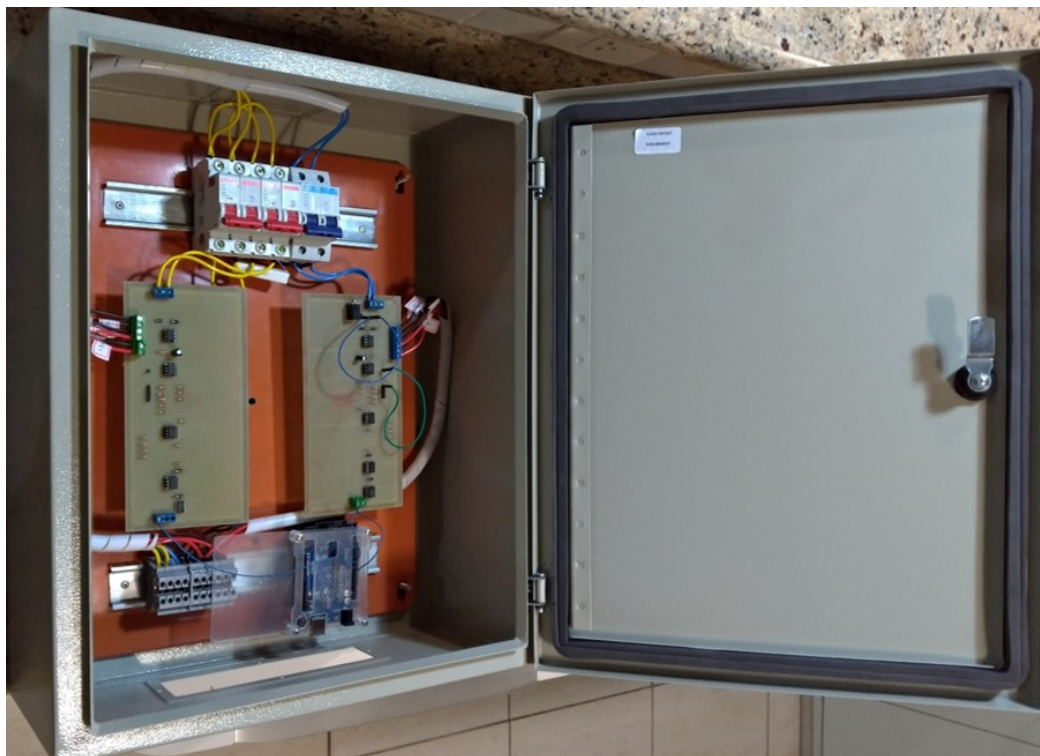


Figura 4.6: Painele com os dispositivos utilizados

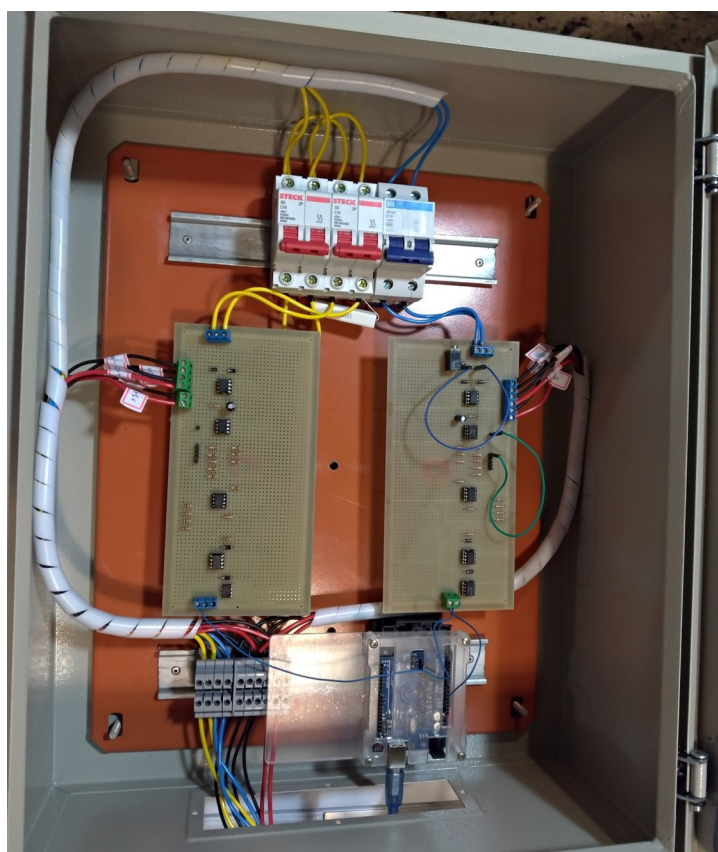


Figura 4.7: Circuito final implementado

4.3 Programação do Arduino Uno aquisição dos sinais e realização dos cálculos

4.3.1 Rotina de interrupção 1: Cálculo da potência ativa

Foram utilizados dois sinais para os cálculos do módulo e fase da FFT, um sinal com menos pontos amostrados, Fig. 4.8, e um com mais pontos amostrados, Fig. 4.9. Ao analisar o espectro de amplitude nas Figs. 4.10 e 4.11, respectivamente, nota-se que a frequência fundamental apontada para a primeira figura é de 60Hz e para a segunda é de 59,22Hz, constatando a falta de precisão do método para o caso estudado, uma vez que para cada sinal amostrado, a FFT pode retornar um valor diferente da frequência fundamental. Também é possível constatar a presença do sétimo harmônico, o qual possui um módulo relevante para a frequência de 420Hz para o caso da Fig. 4.10 e 419,6Hz para o caso da Fig. 4.11. Ao analisar o espectro de fase nas Figs. 4.12 e 4.13 percebe-se como é complexo distinguir os valores calculados e implementar um algoritmo para tal.

Assim, ao implementar a metodologia do cálculo da potência ativa a partir da FFT, observa-se que o número de pontos obtidos não é o suficiente para um cálculo adequado. A corrente possui grandes oscilações de amplitude em curto período de tempo e para solucionar este problema é necessário amostrar muitos pontos em uma janela de tempo muito curta, o que é inviável pela capacidade de processamento do Arduino Uno.

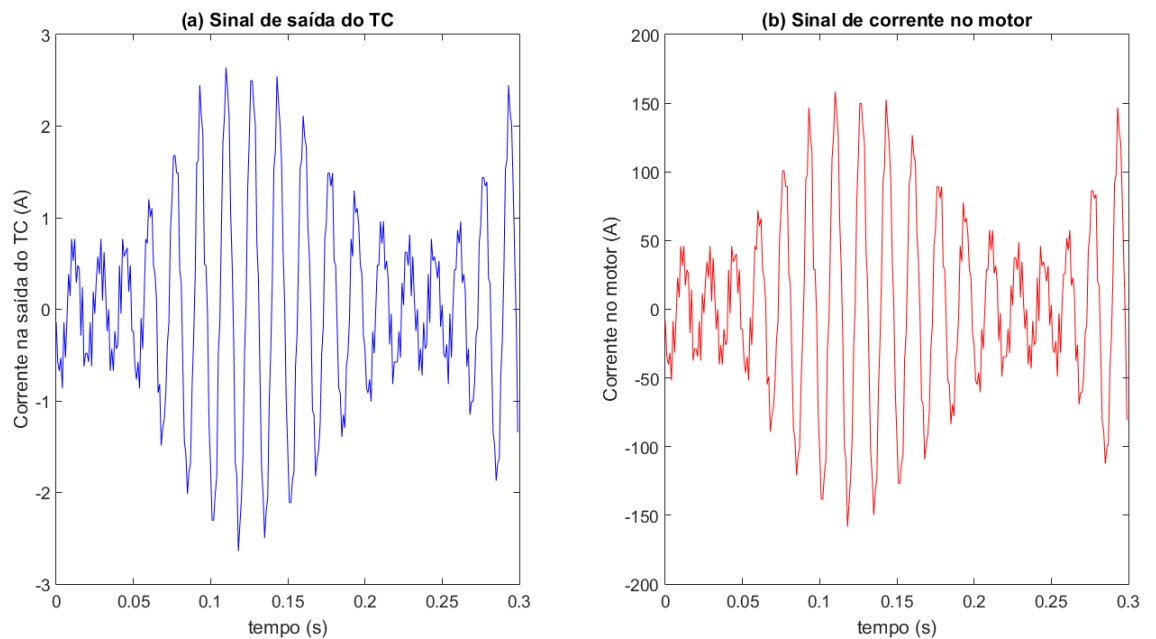


Figura 4.8: (a) Sinal de saída do TC com duração de 0,3s (b) Sinal correspondente à corrente no motor utilizado para implementar a FFT

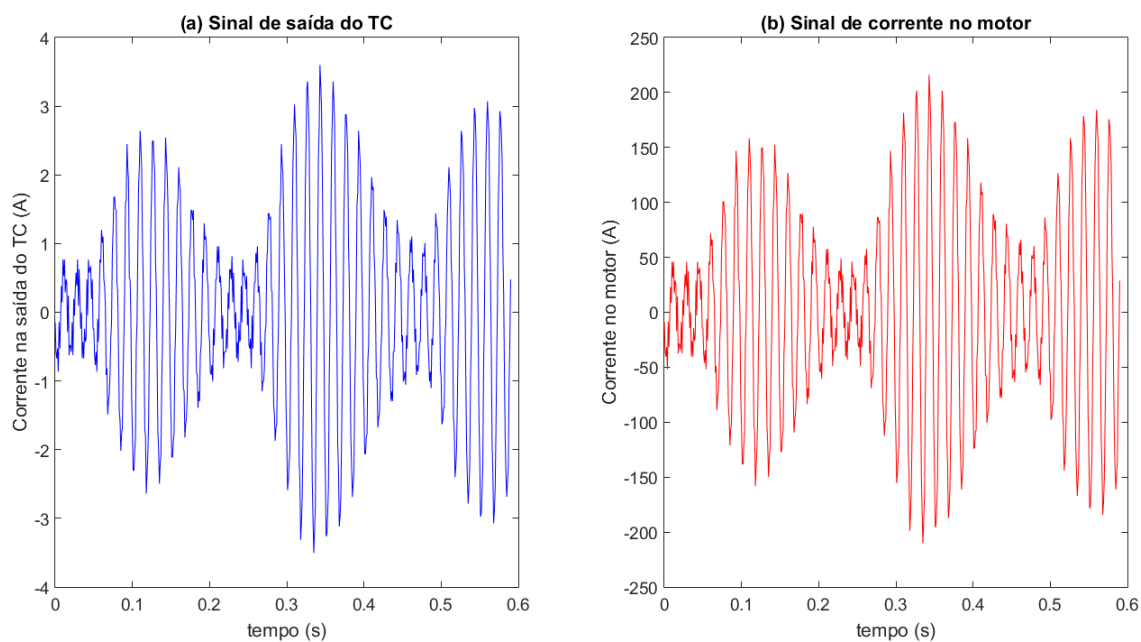


Figura 4.9: (a) Sinal de saída do TC com duração de 0,6s (b) Sinal correspondente à corrente no motor utilizado para implementar a FFT

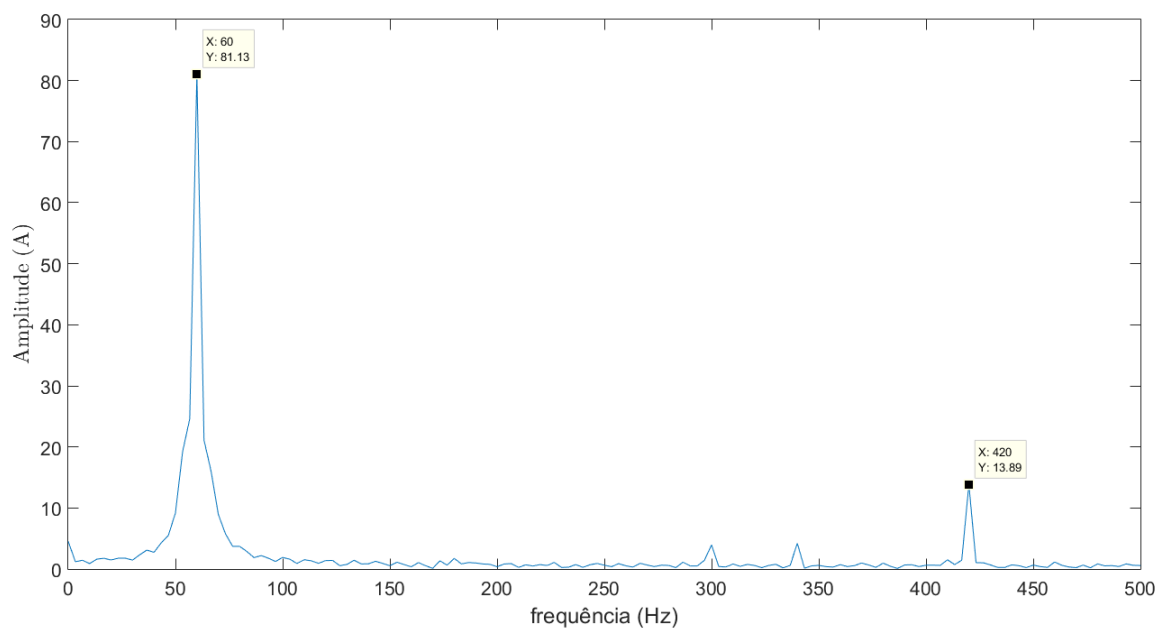


Figura 4.10: Amplitude do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,3s

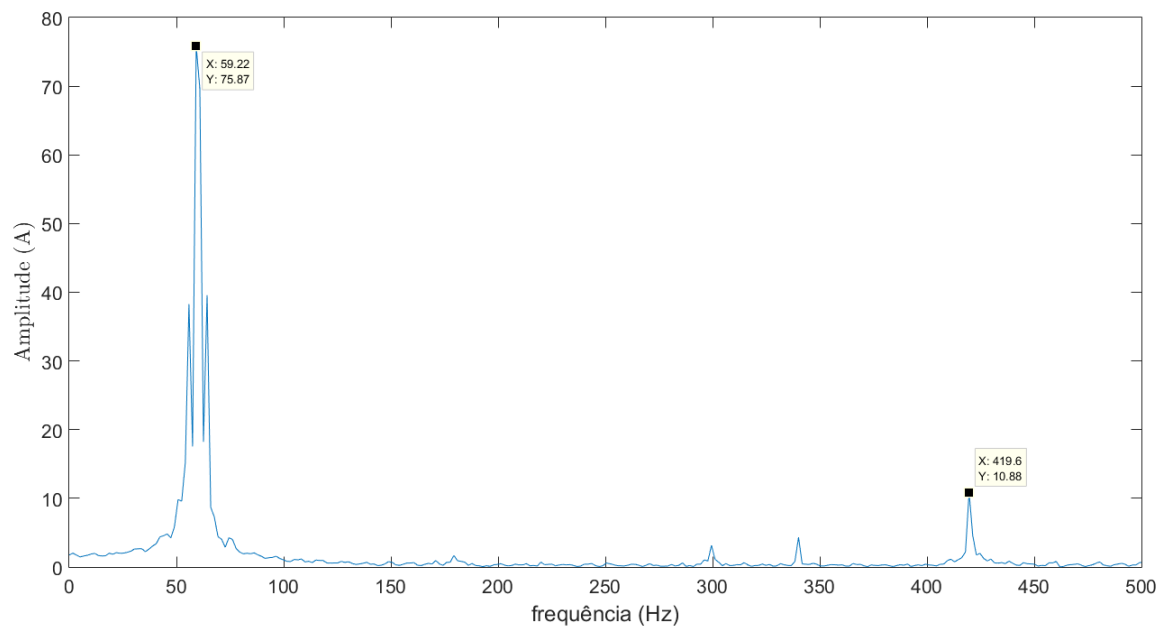


Figura 4.11: Amplitude do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,6s

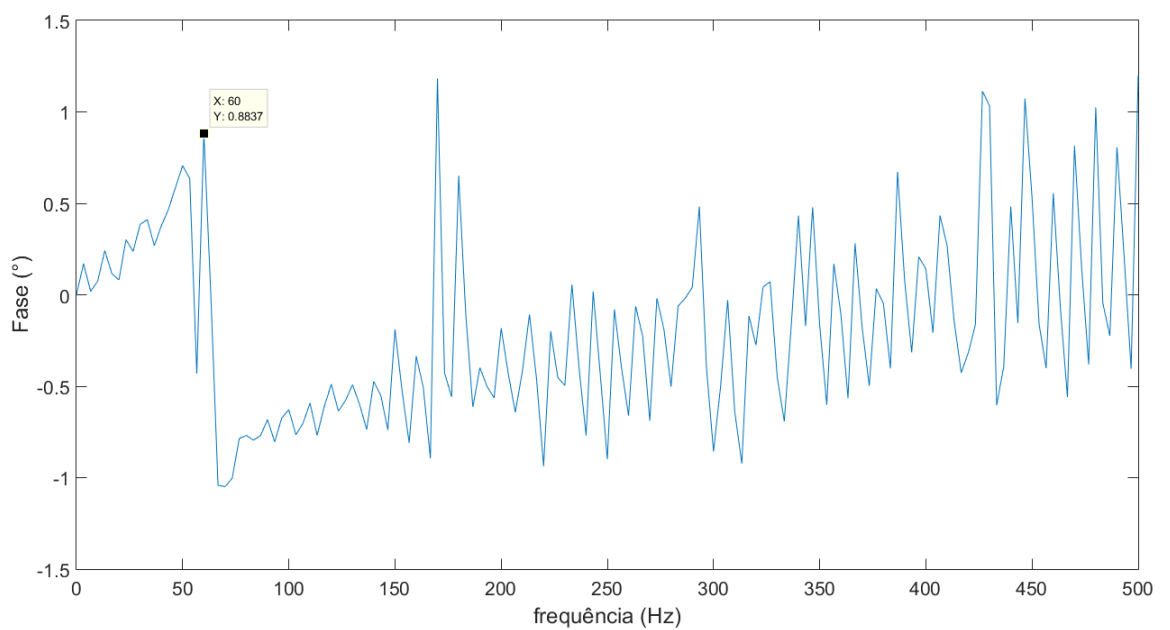


Figura 4.12: Fase do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,3s

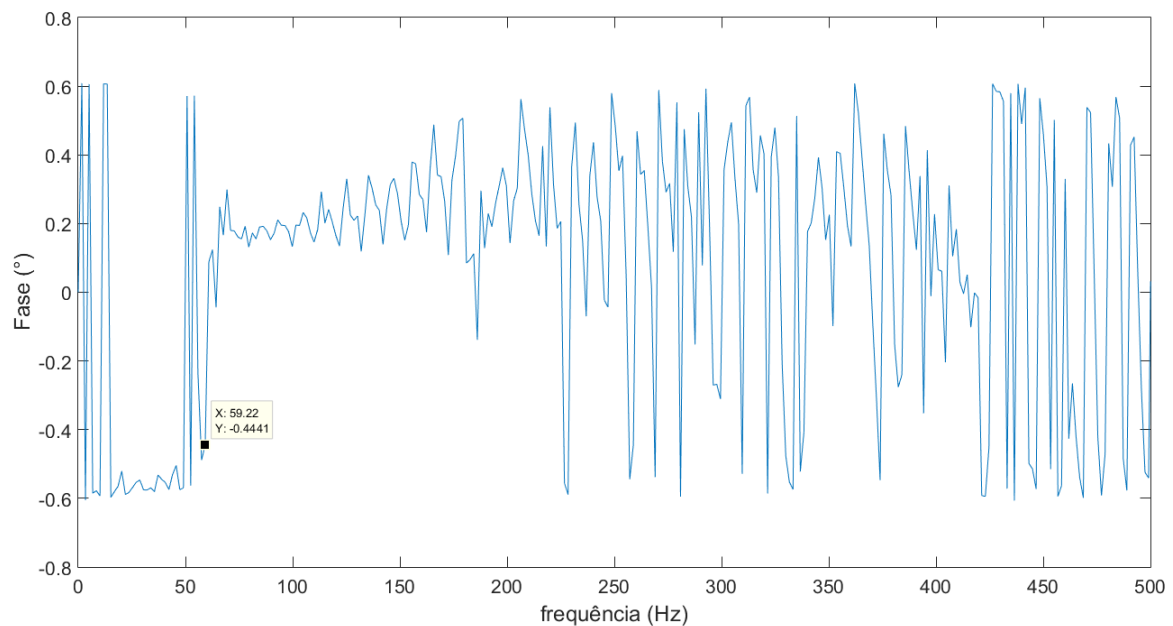


Figura 4.13: Fase do sinal de corrente após a implementação da FFT para o sinal de 0,6s

A segunda metodologia estudada através das equações de potência ativa, potência aparente, tensão e corrente RMS apresentaram resultados satisfatórios. Para validar o algoritmo implementado, utilizou-se sinais de corrente e tensão, a fim de comprovar que a defasagem calculada pelo osciloscópio era compatível com a defasagem calculada no Arduino. A Fig. 4.14 traz os sinais aferidos através do osciloscópio, que apresenta defasagem entre os sinais de $33,2^\circ$, representando um fator de potência de 0,8368. Estes mesmos sinais foram inseridos no Arduino UNO e realizou-se os cálculos propostos. A Fig. 4.15 traz a forma de onda dos sinais lidos pelo Arduino e a Fig. 4.16 traz os resultados dos cálculos realizados, ou seja, a cada três ciclos amostrados é calculado o valor da potência ativa, da tensão e corrente RMS e da potência aparente. O primeiro valor calculado apresenta $P = 9507,62\text{W}$, $V_{RMS} = 212,76$, $I_{RMS} = 53,04$ e $S = 11285,22\text{VA}$, ao realizar o cálculo do fator de potência através da Eq. (4.1) encontra-se um fator de potência de 0,8425, que está bem próximo do calculado pelo osciloscópio, comprovando a eficácia do algoritmo implementado. Inclusive, nota-se que os demais pontos calculados pelo Arduino estão próximos e coerentes entre si.

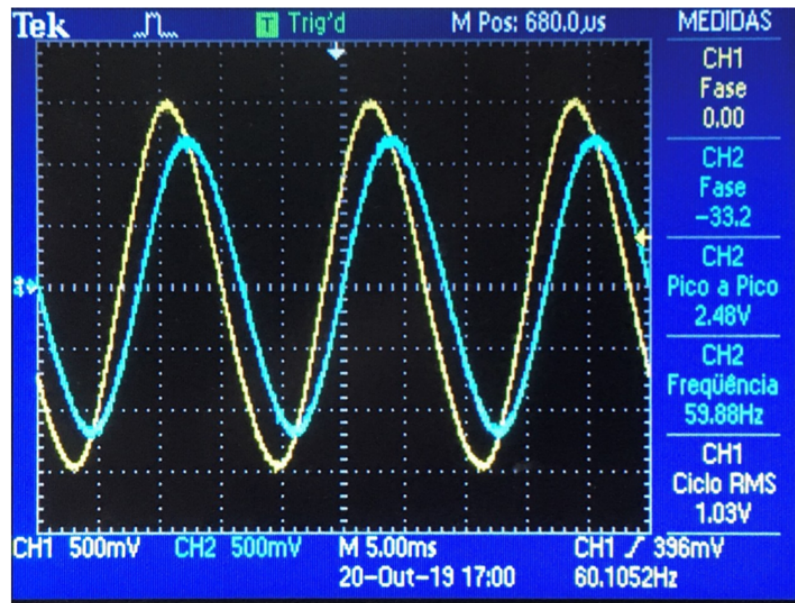


Figura 4.14: Sinal de validação do algoritmo visto através do osciloscópio

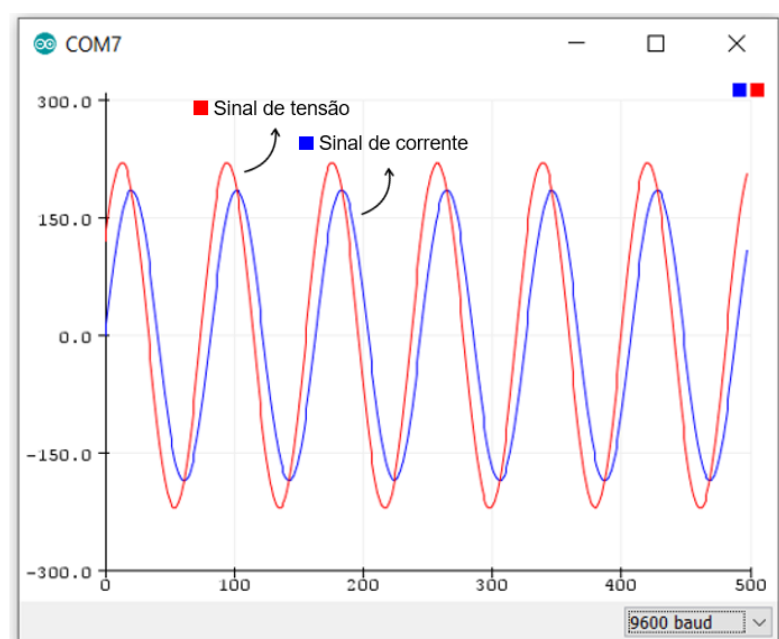


Figura 4.15: Sinal de validação do algoritmo visto através do Arduino

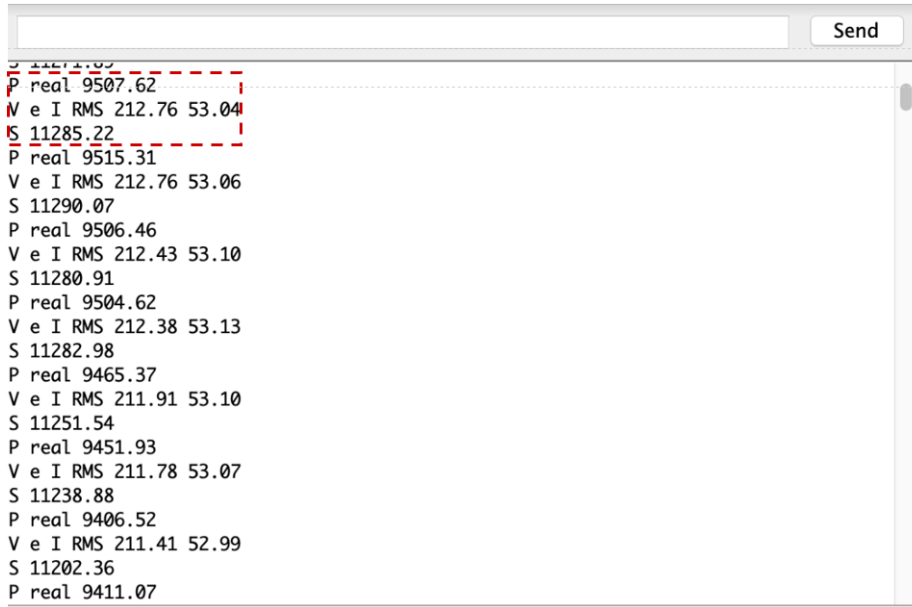


Figura 4.16: Potência ativa, tensão e corrente RMS e potência aparente calculados no Arduino

$$FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} = \frac{9507,62}{11285,22} = 0,8425 \quad (4.1)$$

4.3.2 Rotina de Interrupção 2: Amostragem dos sinais de corrente e tensão

A amostragem dos dados, bem como a retirada do *offset* e a filtragem dos harmônicos foi realizado com êxito. A Fig. 4.17 traz os sinais amostrados sem o valor de *offset* mas ainda apresentando harmônicos no sinal de corrente. Já a Fig. 4.18 traz os dados de tensão e corrente filtrados. Observa-se que há um atraso no sinal devido a aplicação do filtro, por isso é importante realizar a filtragem dos dois sinais, tanto de corrente como de tensão.

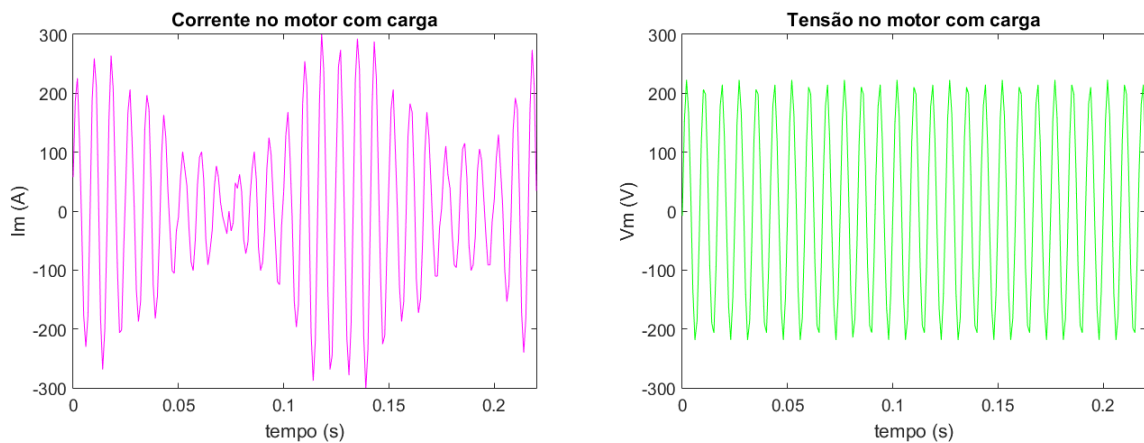


Figura 4.17: Sinal de corrente e tensão amostrado sem o valor do offset

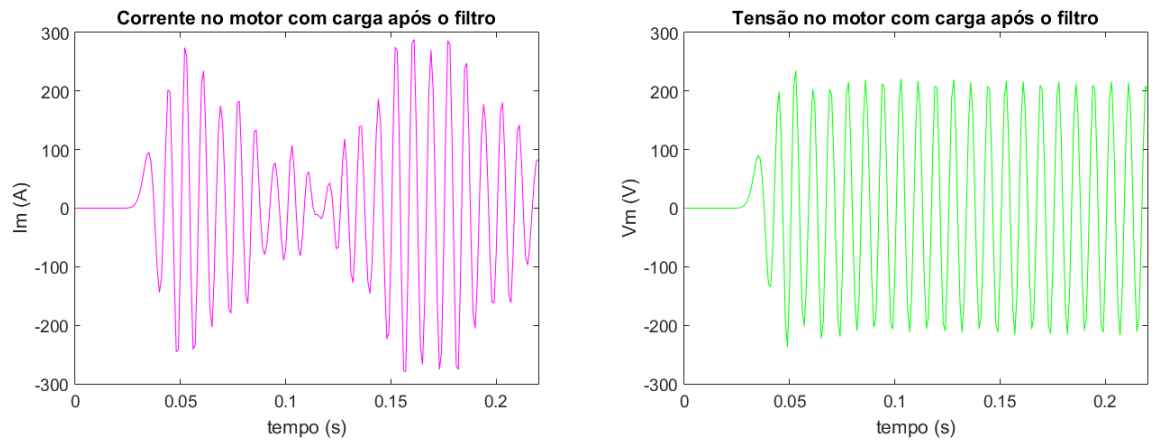


Figura 4.18: Sinal de corrente e tensão amostrado sem o valor do offset e harmônicos

4.4 Ensaio com diferentes cargas

Seguindo a metodologia descrita na Seção 3.5.2, os testes foram realizados para três tipos de carga e os resultados podem ser observados nas Tabs. 4.1, 4.2 e 4.3. Em todos os ensaios realizados observa-se que o desvio padrão da potência ativa é significativamente menor que o da corrente, o que indica que os dados de potência possuem maior uniformidade, sendo mais adequados para o cálculo da produtividade. Em todos os ensaios a tensão no motor manteve-se no valor esperado e com um desvio padrão menor que 2V, o que é esperado, uma vez que a tensão não deve variar com a variação da carga. Vale lembrar que todos os valores apresentados estão em RMS.

Um ponto relevante a ser observado é que os testes são realizados ao observar o volume de pedras na câmara do britador, onde pode haver erro humano na aferição dos ensaios, portanto é mais propenso ao erro a visualização da câmara com 32% da sua capacidade do que com 100%.

4.4.1 Ensaio no motor em vazio

O ensaio em vazio tem grande importância para obter o valor da potência ativa em que o motor é considerado em vazio e não contribui de nenhuma maneira para a produção. O valor médio de potência ativa P1 calculado é de 6,2kW. A corrente está dentro do esperado e está condizente com as amostras anteriores obtidas.

Tabela 4.1: Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor em vazio

Teste	P (kW)	I (A)	V (V)	FP
1	5,497	34,7793	219,4272	0,7203
2	6,0755	40,8176	217,1764	0,6854
3	8,51	58,849	216,8267	0,6669
4	7,5592	47,0608	218,5284	0,7350
5	2,2827	28,4984	219,7162	0,3646
6	2,2651	33,4927	215,9434	0,3132
7	4,5672	34,1104	215,0922	0,6225
8	8,6187	45,4101	215,575	0,8804
9	8,9355	51,3903	215,7595	0,8059
10	4,6957	39,2767	215,9	0,5537
11	5,0037	38,3417	214,078	0,6096
12	4,7863	38,3417	218,5686	0,5318
13	8,4471	48,8438	219,3536	0,7884
14	7,0734	45,2672	219,0778	0,7133
15	9,2013	50,5599	217,1698	0,8380
16	5,2897	42,0728	219,7613	0,5721
17	5,5354	47,0225	220	0,5346
18	5,3539	40,7559	216,1232	0,6078
19	6,1987	44,2823	217,527	0,6435
20	7,8355	45,2553	215,58	0,8031
Máximo	9,2013	58,8490	220	0,8804
Mínimo	2,2651	28,4984	214,078	0,3132
Média	6,1866	42,8631	217,3592	0,6495
Desvio Padrão	2,0480	7,1071	1,8237	0,1477

4.4.2 Ensaio no motor com 32% da carga

O ensaio com 32% da carga é importante para obter o valor em que o motor está operando abaixo da sua capacidade nominal e apresenta baixa produtividade. A sua aferição é mais difícil que as demais, uma vez que a visualização das pedras na metade da altura útil da câmara é realizada a olho nu. O valor médio de potência ativa P2 calculado através desse ensaio é de 22,8kW. Nota-se que a potência mínima de 7,5574kW do teste número 10 está muito próximo da medida para o motor em vazio. Isso é totalmente possível, uma vez que entre a britagem de uma pedra e outra pode haver um espaço físico entre as pedras e o britador pode ficar algum instante de tempo operando em vazio.

Tabela 4.2: Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor com 32% da carga

Teste	P (kW)	I (A)	V (V)	FP
1	39,4627	193,3676	217,3538	0,9389
2	13,0416	62,9628	217,3687	0,9529
3	20,8117	97,8938	217,8383	0,9759
4	14,49	69,1537	218,2428	0,9601
5	35,1912	171,8474	219,2164	0,9342
6	14,3558	69,3513	219,6478	0,9424
7	36,6022	150,6801	219,2883	0,9867
8	23,2018	108,9954	218,4161	0,9704
9	19,8898	126,9337	219,5857	0,7136
10	7,5574	45,3735	219,7664	0,7562
11	28,4803	137,5877	219,9277	0,9411
12	23,9765	115,6991	218,0594	0,9503
13	16,8309	85,6467	219,02	0,8972
14	33,5896	165,9952	216,8882	0,9330
15	21,4861	100,8286	219,2995	0,9839
16	22,56142	109,8574	219,7295	0,9365
17	18,5926	87,9855	216,7295	0,9750
18	26,8312	129,9606	216,1182	0,9553
19	19,9953	127,8831	219,4132	0,7126
20	23,2496	108,0932	219,8665	0,9783
Máximo	39,4627	193,3676	219,9277	0,9867
Mínimo	7,5574	45,4735	216,1182	0,7126
Média	22,8049	113,3103	218,4311	0,9197
Desvio Padrão	8,0695	38,4950	1,2396	0,0860

4.4.3 Ensaio no motor com 100% da carga

O ensaio com 100% da carga é primordial para o cálculo da produtividade, aonde o motor está operando na região de alta produtividade e é neste patamar que deve haver o empenho de manter a produção. Ao realizar os testes, o valor médio de potência ativa P3 encontrado foi de 42kW. Os valores calculados estão dentro do esperado.

Tabela 4.3: Potência ativa, corrente, tensão e fator de potência para o motor com 100% da carga

Teste	P (kW)	I (A)	V (V)	FP
1	45,7664	213,4221	219,4901	0,9770
2	58,0822	273,6257	219,9284	0,9652
3	35,0284	164,3715	219,1918	0,9722
4	47,1284	222,0811	218,1506	0,9728
5	34,9932	162,6376	219,6802	0,9794
6	26,4516	125,8571	219,9236	0,9557
7	32,384	150,5988	219,7332	0,9786
8	44,0194	202,8	219,6973	0,9880
9	35,3454	164,5926	219,7696	0,9771
10	27,1483	177,0031	219,9926	0,954
11	25,381	121,0812	219,6606	0,9543
12	39,2568	186,6521	218,3499	0,9632
13	56,7996	270,9982	219,3327	0,9556
14	37,4968	173,6116	219,057	0,986
15	55,6776	264,0589	218,8899	0,9633
16	47,498	221,1428	219,3815	0,979
17	53,0804	245,0164	219,8894	0,9852
18	51,37	238,4539	219,5576	0,9812
19	40,898	190,8009	219,0347	0,9786
20	36,586	170,8947	217,9814	0,9821
Máximo	58,0822	273,6257	219,9926	0,9880
Mínimo	25,381	121,0812	217,9814	0,9540
Média	42,0196	196,9850	219,3346	0,9724
Desvio Padrão	9,6909	45,5556	0,5987	0,0113

4.4.4 Relação entre produtividade e potência ativa

Após a realização dos testes é possível obter a relação entre os valores de potência ativa e a produtividade do motor, que pode ser visto na Tab. 4.4. Para determinar a curva que melhor representa esta relação, utilizou-se a linha de tendência do *software MS Excel*, que determina a melhor reta relacionando os pontos de potência ativa e altura das pedras na câmara do britador. A equação fornecida pode ser vista na Fig. 4.19 e será utilizada para determinar a altura de pedras na câmara do britador a partir do valor calculado de potência ativa.

Tabela 4.4: Produtividade e potência ativa após o ensaio com diferentes cargas

Carga	Produtividade	Altura das pedras (cm)	Média da potência ativa (kW)
Vazio	0%	0	6,2
32% da carga	32%	70	22,8
100% da carga	100%	140	42

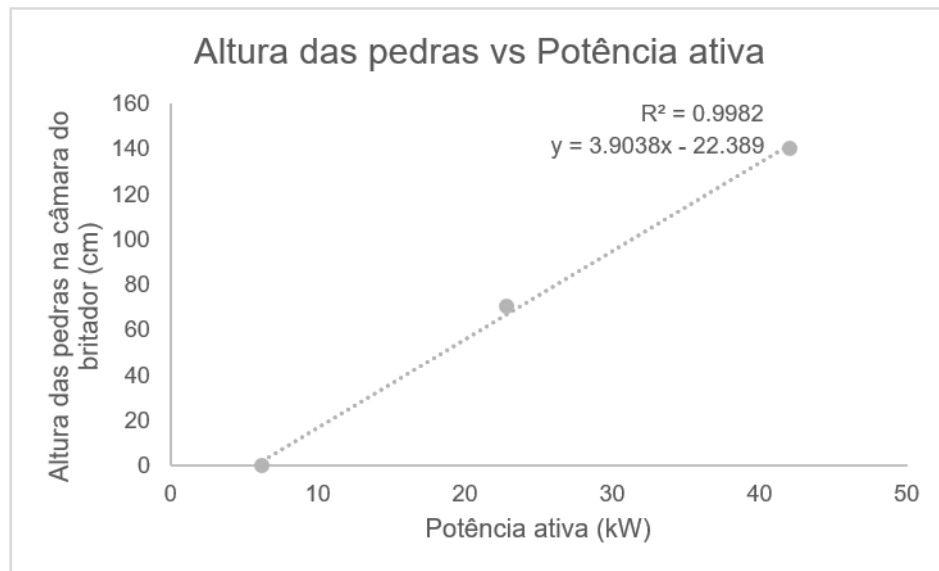


Figura 4.19: Curva de tendência entre a altura das pedras na câmara do britador e a potência ativa

4.5 Visualização dos dados de produtividade

4.5.1 Cálculo da produtividade

Para realizar o cálculo da produtividade e gerar os dados necessários para o relatório/painel de controle, será utilizado um arquivo *Excel* com três abas padrões: "Configurações", "Dados" e "Resultados". A aba "Configurações" é onde são criadas as abas "Dados" e "Resultados" do respectivo dia de medição, a aba "Dados" recebe os dados de data, hora e potência ativa enviados pelo Arduino e a aba "Resultados" realiza o cálculo de produtividade e é a base de dados para o *Power BI*. Todo mês será criado um novo arquivo onde conterà todos os dias em que foi solicitado a aquisição de dados do Arduino e cálculo da produtividade naquele mês.

A aba "Configurações", como mostra a Fig. 4.20, será a primeira aba a ser visualizada quando o arquivo for aberto. Nela é possível gerar as abas "Dados" e "Resultados" de cada dia clicando no botão "Clique aqui para gerar as abas de hoje", como também apagar as abas existentes. Os campos "Dia", "Mês" e "Ano" são automaticamente preenchidos para o dia respectivo dia.

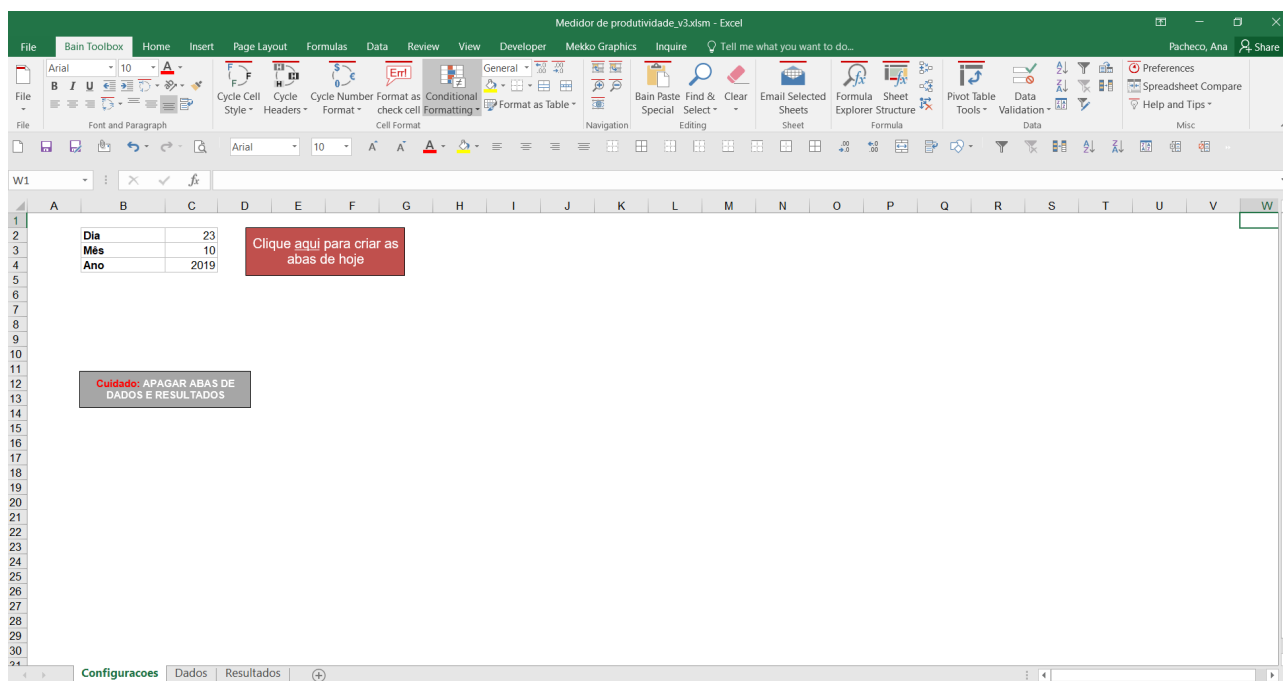


Figura 4.20: Aba "Configurações" do arquivo *Excel* para cálculo da produtividade

A aba "Dados" é a aba padrão que será gerada quando o usuário clicar no botão "Clique aqui para gerar as abas de hoje". Portanto, caso seja necessário fazer alguma alteração nesta aba, deve-se fazer na aba "Dados". A Fig. 4.21 mostra a aba padrão criada e a Fig. 4.22 mostra a aba gerada para um dia de medição, que contém os dados enviados do Arduino e segue o padrão da aba "Dados". Para iniciar a comunicação dos dados com o Arduino, basta clicar no botão "Conectar" da janela do PLX-DAQ. Nessa janela também é possível pausar a comunicação de dados, resetar o tempo e apagar os dados. Há também o botão "Configurações" que retorna para a aba "Configurações".

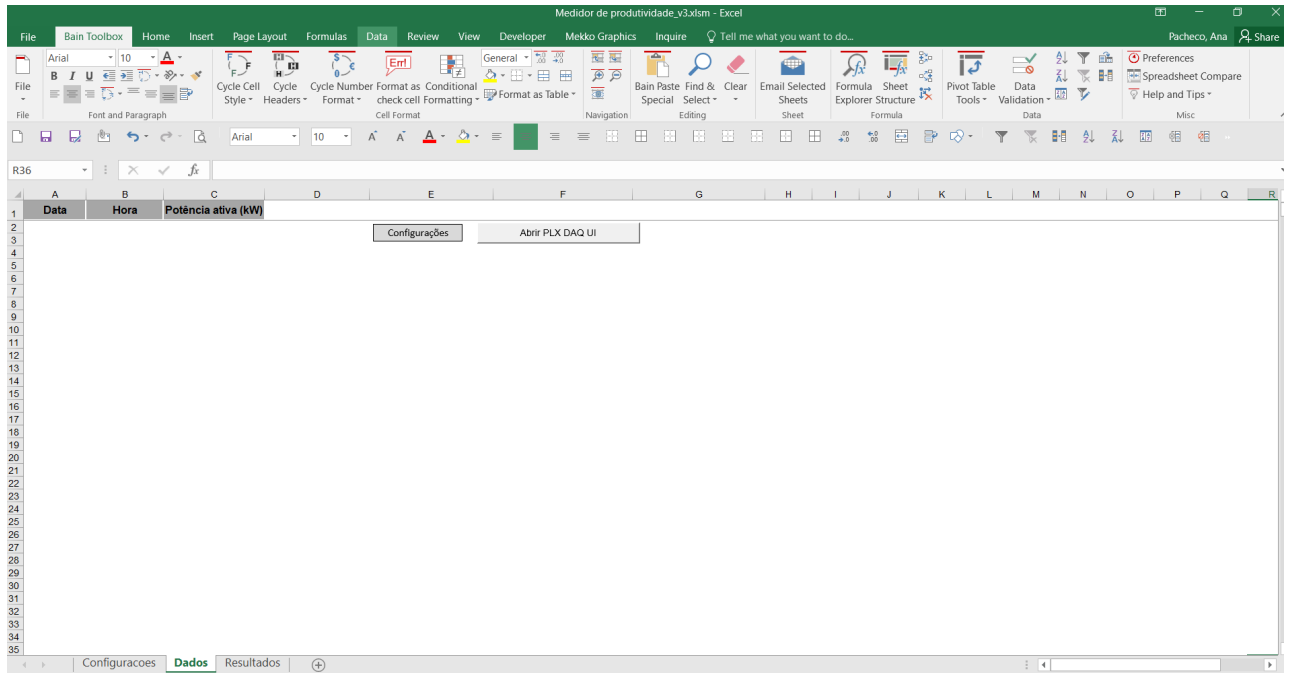


Figura 4.21: Aba "Dados" do arquivo *Excel* para cálculo da produtividade

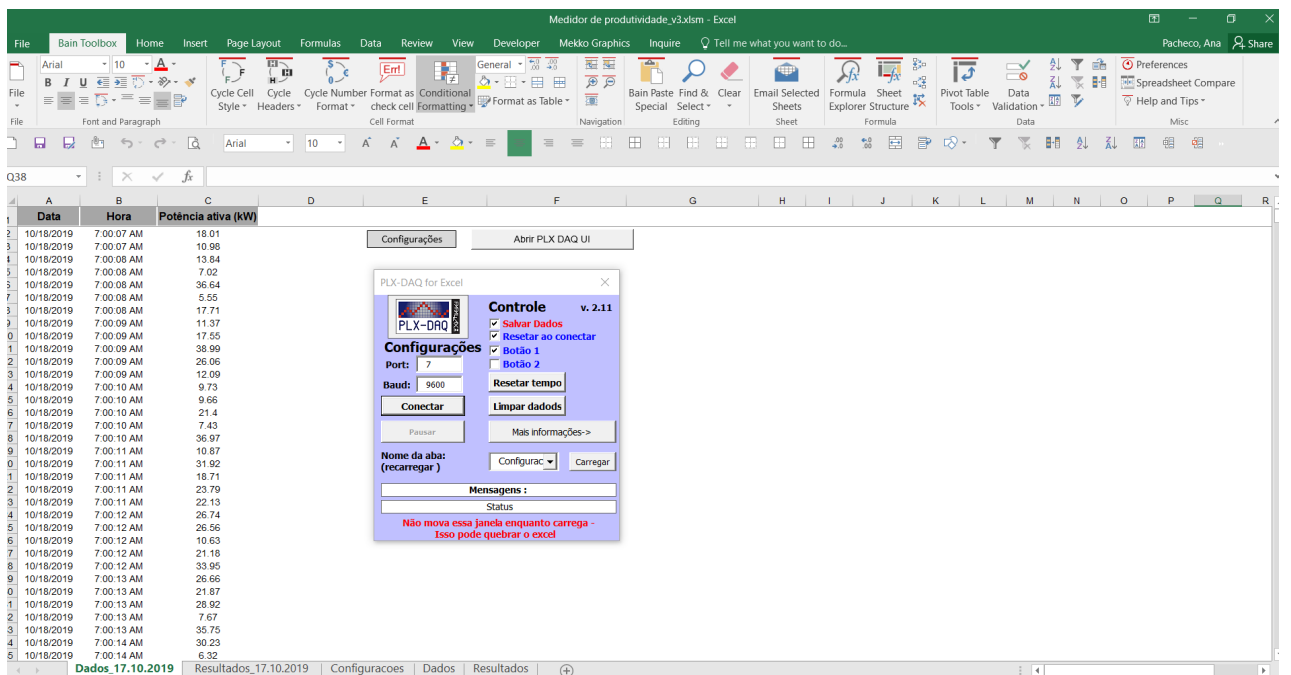


Figura 4.22: Aba "Dados" do arquivo *Excel* para cálculo da produtividade preenchido para um dia de medição

A aba "Resultados" é a aba padrão que será gerada quando o usuário clicar no botão "Clique aqui para gerar as abas de hoje". Portanto, caso seja necessário fazer alguma alteração nesta aba, deve-se fazer na aba "Resultados". A Fig. 4.23 mostra a

aba padrão criada e a Fig. 4.24 mostra a aba gerada para um dia de medição, que contém os dados de data, hora e potência ativa copiados da aba "Dados", a produtividade calculada a partir equação da curva de tendência da Fig. 4.19, com um condicional que a produtividade não pode ser menor que 0% nem maior que 100%. As colunas "Categoria hora" e "Categoria minuto" são os dados, respectivamente, da hora e minuto de cada medição, que são importantes para criar as categorias do gráfico do painel de controle.

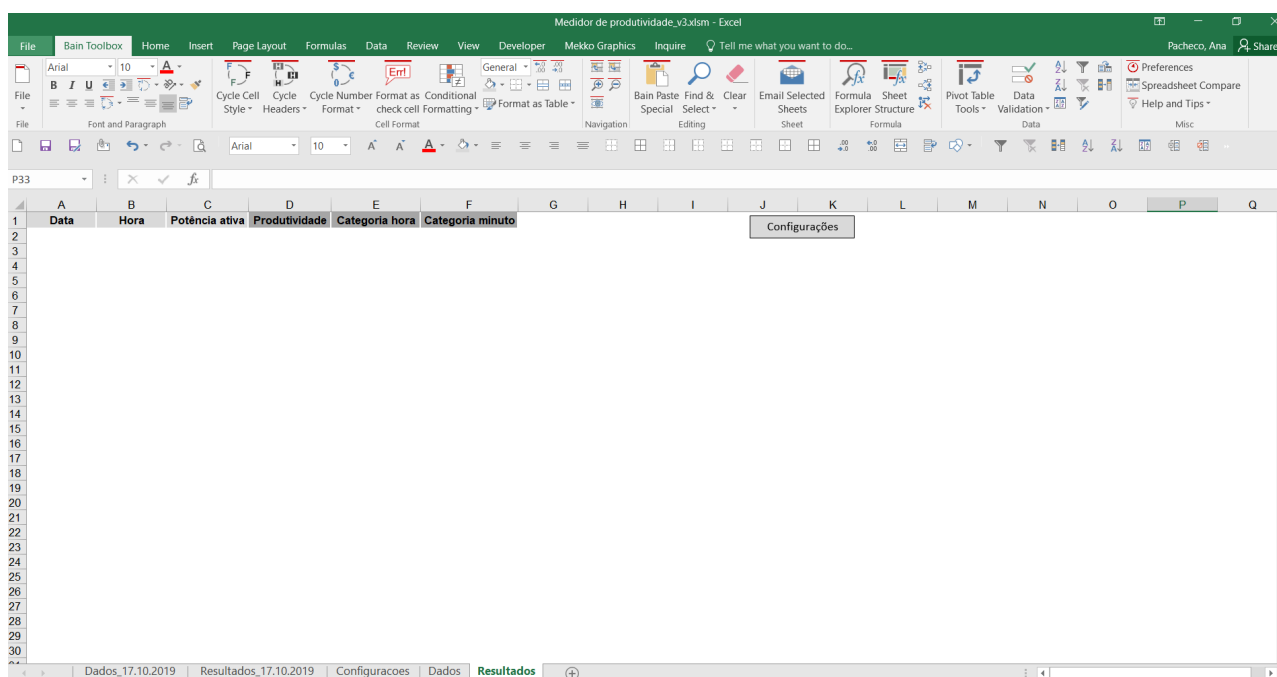


Figura 4.23: Aba "Resultados" do arquivo Excel para cálculo da produtividade

	B	C	D	E	F
	Hora	Potência ativa	Produtividade	Categoria hora	Categoria minuto
2	0.29174769	18.01	36.31%	7	0
3	0.29174769	10.98	12.81%	7	0
4	0.29175926	13.84	21.58%	7	0
5	0.29175926	7.02	2.44%	7	0
6	0.29175926	36.64	100.00%	7	0
7	0.29175926	5.55	0.00%	7	0
8	0.29175926	17.71	35.18%	7	0
9	0.29177083	11.37	13.94%	7	0
10	0.29177083	17.55	34.57%	7	0
11	0.29177083	38.99	100.00%	7	0
12	0.29177083	26.06	71.24%	7	0
13	0.29177083	12.09	16.09%	7	0
14	0.29178241	9.73	9.31%	7	0
15	0.29178241	9.66	9.12%	7	0
16	0.29178241	21.4	49.98%	7	0
17	0.29178241	7.43	3.42%	7	0
18	0.29178241	36.97	100.00%	7	0
19	0.29179398	10.87	12.49%	7	0
20	0.29179398	31.92	100.00%	7	0
21	0.29179398	18.71	39.01%	7	0
22	0.29179398	23.79	60.52%	7	0
23	0.29179398	22.13	53.12%	7	0
24	0.29180556	26.74	74.58%	7	0
25	0.29180556	26.56	73.69%	7	0
26	0.29180556	10.63	11.81%	7	0
27	0.29180556	21.18	49.04%	7	0
28	0.29180556	33.95	100.00%	7	0
29	0.29181713	26.66	74.18%	7	0
30	0.29181713	21.87	51.99%	7	0

Figura 4.24: Aba "Resultados" do arquivo Excel para cálculo da produtividade preenchido para um dia de medição

4.5.2 Relatório no Power BI

Para acessar o painel de controle no *Power BI* deve-se acessar o site <https://powerbi.microsoft.com/pt-br/> e então acessar a conta cadastrada e selecionar o relatório que deseja visualizar.

O relatório da produtividade do motor pode ser observado na Fig. 4.25 e na plataforma é possível editar, programar os horários de atualização dos dados, exportar o relatório para o *MS PowerPoint* ou em PDF. Os dados filtrados pelo exibidor do relatório pode ser visto na Fig. 4.26. No exemplo mostrado, há apenas dados de dois dias, porém o relatório é capaz de mostrar quantos dados seja necessário, sendo possível mostrar os dados de todo o ano ou fazer comparação com anos anteriores. A ferramenta é de fácil utilização e com *layout* intuitivo que facilita a visualização e interpretação dos dados.

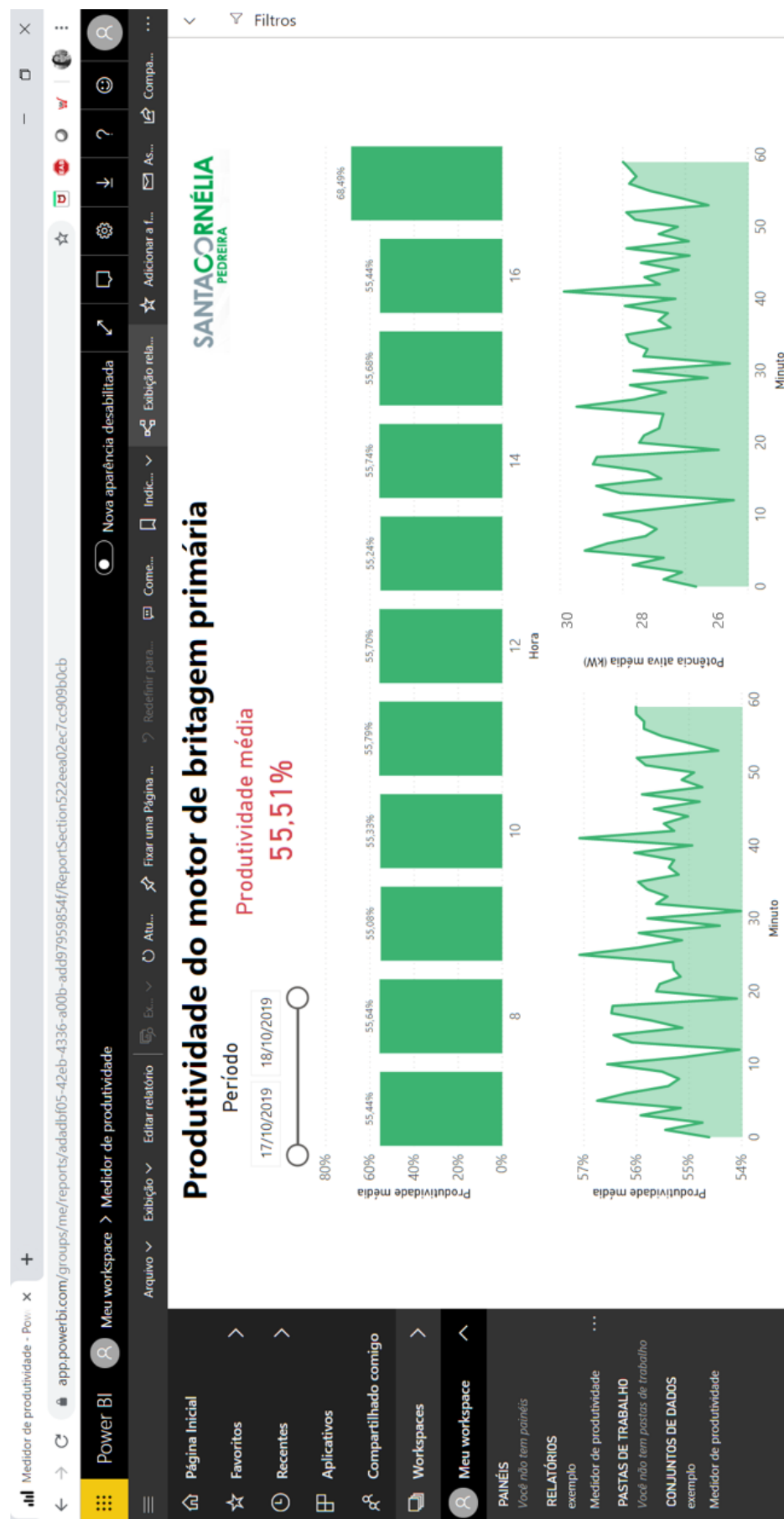


Figura 4.25: Relatório final de produtividade do motor de britagem primária

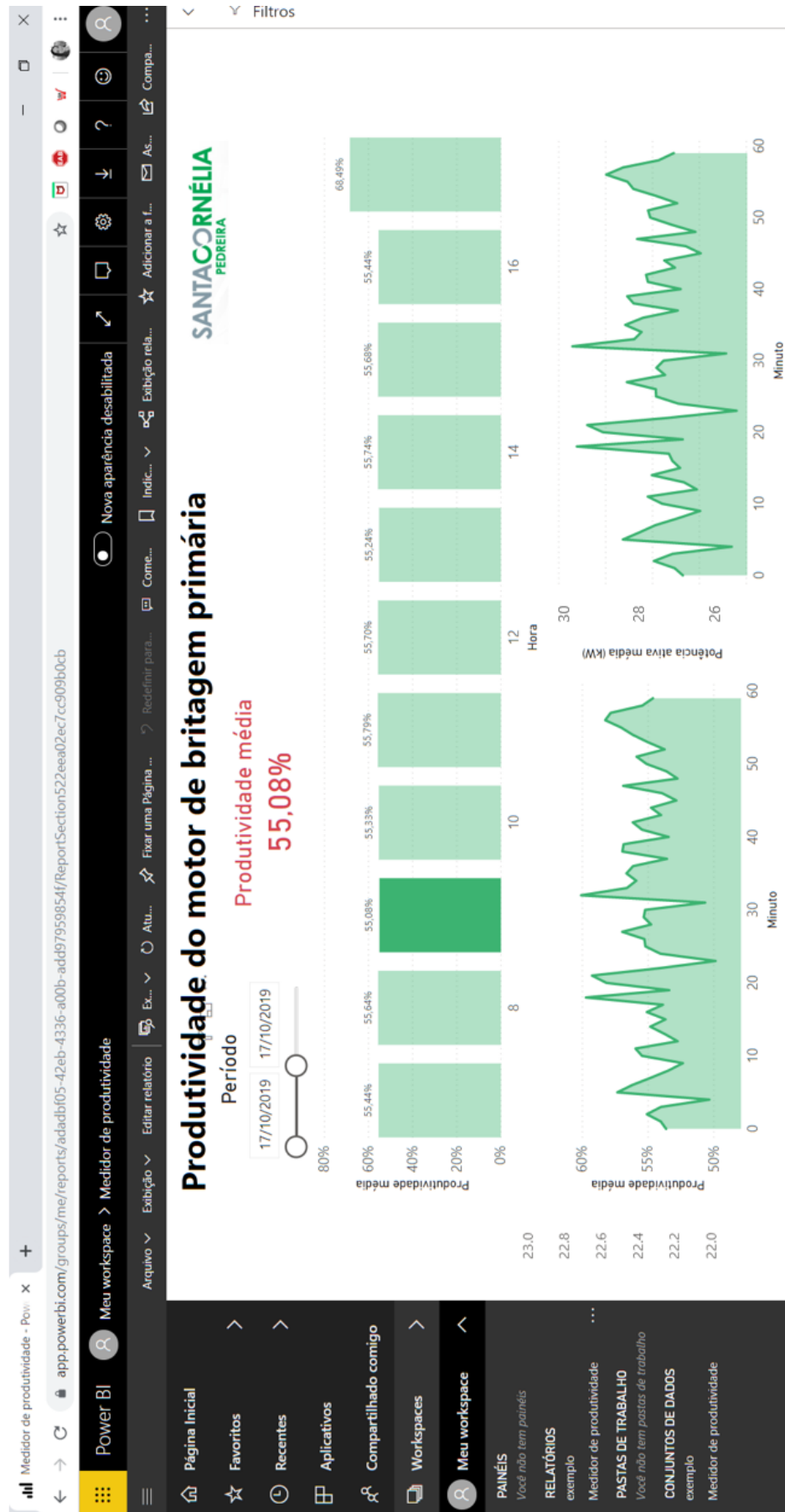


Figura 4.26: Relatório final de produtividade do motor de britagem primária com filtragem de dados para às 9h do dia 17/10/2019

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão geral

- Medidor de potência ativa

O medidor de potência ativa foi projetado utilizando um Arduino UNO para amostrar os sinais de tensão e corrente do motor a uma frequência de 1920Hz e calcular a potência ativa a cada 200ms. Os dados de potência ativa calculados são enviados através do software PLX-DAQ para um arquivo *Excel* no computador, que necessita de um cabo de conexão USB para conectar o Arduino e o computador.

- Cálculo da produtividade

O cálculo de produtividade é realizado no arquivo *Excel* do computador através da equação que possui como variável a altura das pedras no britador, que é calculada através da reta entre a altura das pedras na câmara do britador e a potência ativa do motor. A reta foi construída a partir dos ensaios realizados com o volume da câmara do britador preenchido em 0%, 32% e 100%, representando respectivamente uma produtividade de 0%, 32% e 100%.

- Relatório

O relatório para visualização dos dados de produtividade e potência ativa foi desenvolvido no *software Power BI*, uma ferramenta de fácil acesso e entendimento, que pode ser utilizada por gestores que não estão familiarizados com a área de estudo do projeto. Os dados do *Excel* alimentam a base de dados do *Power BI*, que na versão gratuita pode ser atualizada até oito vezes ao dia. Os dados apresentados podem ser utilizados para comparar produções diárias, mensais, de épocas sazonais e até entre anos, criando uma base de dados com informações relevantes de potência ativa do motor que pode ser utilizado para outras finalidades, como, por exemplo, para o cálculo do consumo de energia elétrica.

O medidor de produtividade desenvolvido permite que a Pedreira Santa Cornélia mensure a produtividade do seu britador primário, de modo a acompanhar se o volume de pedras que está alimentando a câmara do britador primário durante o período de produção está adequado. Como a empresa não possui nenhum dado sobre a quantidade de pedras britadas, apenas a quantidade vendida e entregue aos seus clientes, este projeto é o primeiro passo para a implantação de um sistema de medição de produtividade e eficiência da cadeia produtiva. Com o dado de produtividade é possível que a gerência defina metas claras (baseada em números), de forma a estruturar sua cadeia produtiva com uma maior previsibilidade do material produzido e otimizar o seu planejamento econômico.

5.2 Trabalhos futuros

Para a melhoria contínua do medidor de produtividade pode-se implementar algumas alterações futuras no projeto:

- Utilizar três transformadores de corrente, um em cada fase do motor, e calcular a média dos valores de corrente para o cálculo da potência ativa;
- Utilizar um transformador de potencial com relação de transformação de 380V:5V, a fim de trabalhar na faixa linear do transformador;
- Realizar ensaios com um número maior de cargas para refinar a curva de tendência entre a potência ativa e produtividade, que inclusive pode sofrer alterações caso a matéria-prima utilizada tenha alguma alteração;
- Desenvolver um sistema de comunicação entre o Arduino UNO e o *Excel* que não dependa da conexão humana através do PLX-DAQ, evitando assim que algum dado não seja armazenado devido ao erro humano. Pode-se utilizar uma placa de *Ethernet shield* para realizar a comunicação através do *wifi*, por exemplo;
- Utilizar uma conta paga do *Power BI* que permite a atualização dos valores de produtividade e potência ativa entre o *Excel* e o relatório em tempo real.

A versão digital deste trabalho e os arquivos utilizados no Arduino Uno e Excel podem ser visualizados através do link <<http://redmine2.lacosep.sel.eesc.usp.br/documents/135>>.

REFERÊNCIAS

- ATMEL. **Atmel AVR465: Single-Phase Power/Energy Meter with Tamper Detection**. 2013. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-2566-Single-Phase-Power-Energy-Meter-with-Tamper-Detection_Ap-Notes_AVR465.pdf>.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CNI. **Indicadores Industriais - Utilização da capacidade instalada no Brasil (23 Produtos de minerais não metálicos Percentual médio)**. 2018. Disponível em: <<http://www6.sistemaindustria.org.br/gpc/externo/consultarResultados.faces>>.
- FIGUEIRA, H. V. O. **Britagem e Moagem**. [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/732/1/CCL00260010.pdf>>.
- FITZGERALD. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. [S.l.: s.n.], 2014.
- JAWMASTER. **Catálogo de britadores de mandíbula móvel**. 1997.
- MACEDO, M. de M. **Gestão da produtividade nas empresas**. 2012. Disponível em: <<https://www.uninter.com/revistaorganizacao sistematica/index.php/organizacaoSistematica/article/viewFile/65/39>>.
- MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. Brasil: [s.n.], 2015.
- OPENENERGY. **Digital filters for offset removal**. 2019. Disponível em: <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ctac/digital-filters-for-offset-removal>>.
- PARALLAX. **Software PLX-DAQ**. 2014. Disponível em: <<https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>>.
- POWERBI. 2019. Disponível em: <<https://powerbi.microsoft.com/pt-br/>>.
- SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. Ontario: [s.n.], 2012.
- WEG. **Motores Elétricos - Guia de Especificação**. 2015. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>.

Apêndices

APÊNDICE A – PROGRAMA IMPLEMENTADO NO ARDUINO UNO

```

#include <TimerOne.h>

extern "C" {
#include "simpleDSP_iir.h"
}

#define T_SAMPLE 200000
#define SAMPLES 96 // 32 pontos por ciclo, amostra 3 ciclos

/* Fatores de multiplicacao de V e de I */
#define FATOR_V 0.072
#define FATOR_I 2.933

/* Pinos de entrada e de saída */
int analogV = A0;
int analogI = A1;

/* Vetores para armazenar amostras de V e de I */
float V[SAMPLES];
float I[SAMPLES];

/*
    Valor inicial do filtro passa-baixa de offset
    para reduzir tempo de convergencia

Referência: Filters for offset removal */

float offsetV = 512;
float offsetI = 512;

int sample_count = 0;
bool send_data = true;

/* Filtro passa-baixa */
float coefB[4] = {

```

```
    0.0381,  
    -0.0327,  
    -0.0327,  
    0.0380  
};  
  
float coefA[4] = {  
    1,  
    -2.6960,  
    2.4827,  
    -0.7761  
};  
  
IIR iirV, iirI;  
float filteredV, filteredI;  
  
void setup() {  
  
    /* Configuração dos pinos de entrada e saída */  
    pinMode(2, OUTPUT);  
    pinMode(3, OUTPUT);  
    pinMode(analogV, INPUT);  
    pinMode(analogI, INPUT);  
  
    /* TIMER 1 - 5Hz */  
    Timer1.initialize(T_SAMPLE);  
    Timer1.attachInterrupt(isr_timer1);  
  
    /*  
        TIMER 2 - 1920Hz
```

Referência: [Timer interrupt tutorial](#)

```
    32 pontos por ciclo -> 1920Hz  
    prescaler de 64  
    contagem até 130 = 1923Hz  
    contagem até 131 = 1908Hz  
    Tive que colocar 129 para medir frequencia de 1922Hz  
    */
```

```
// Habilita int contador A TIMER2 arduino
TIMSK2 = (TIMSK2 & B11111001) | 0x02;

// Prescaler de 64
TCCR2B = (TCCR2B & B11111000) | 0x04;

// Valor máx contador 2
OCR2A = 129;

/* Inicia Porta Serial */
Serial.begin(9600);

/* Filtros passa-baixa */
iirInit(&iirV, 4, coefB, 4, coefA);
iirInit(&iirI, 4, coefB, 4, coefA);

}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

}

void multArray(float mult_factor, float *indata, int len){
/* Multiplica todos os elementos do array indata
    pelo número mult_factor. len é o número de
    posições do array indata.
*/
    for(int i = 0; i < len; i++){
        indata[i] = indata[i] * mult_factor;
    }
}

float calc_p_real(float *V, float *I, int len){
/* Calcula potencia ativa usando pontos
    amostrados de tensão e de corrente.
*/
    float retval = 0;
```

```
    for (int i = 0; i < len; i++){
        retval += V[i] * I[i];
    }
    return retval / (float) len;
}

float rms(float *indata, int len){
/* Calcula valor RMS do sinal no array indata
   e com número de pontos len.
*/
    float retval = 0;
    for (int i = 0; i < len; i++){
        retval += indata[i] * indata[i];
    }
    retval = retval / (float) len;
    retval = sqrt(retval);

    return retval;
}

// Rotina de interrupção do TIMER 1 - 5Hz
void isr_timer1(){

    /* Verifica se todos os pontos foram amostrados */
    if (sample_count == SAMPLES){

        /* Transforma medicoes de counts do
           Arduino para valores reais      */
        multArray(FATOR_V, V, SAMPLES);
        multArray(FATOR_I, I, SAMPLES);

        /* Potencia Real */
        float p_real = calc_p_real(V, I, SAMPLES);

        /* Potencia aparente */
        float v_rms = rms(V, SAMPLES);
        float i_rms = rms(I, SAMPLES);
        float S = v_rms * i_rms;
```

```
/* Envia valores medidos para o excel */
Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME," + p_real);

/* Reinicia a amostragem dos pontos */
sample_count = 0;
}
}

// Rotina de interrupcao TIMER 2 - 1920Hz
ISR(TIMER2_COMPA_vect){
  /* Reset do contador */
  TCNT2 = 0;

  /* Adquire sinal de tensão e corrente */
  int sampleV, sampleI;
  sampleV = analogRead(analogV);
  sampleI = analogRead(analogI);

  /* Filtro passa baixa offset */
  offsetV = offsetV + ((sampleV - offsetV) / 1024);
  offsetI = offsetI + ((sampleI - offsetI) / 1024);

  sampleV = sampleV - offsetV;
  sampleI = sampleI - offsetI;

  /* Filtro passa altas para eliminar harmonicos */
  filteredV = iirFilt(&iirV, sampleV);
  filteredI = iirFilt(&iirI, sampleI);

  /* Armazena pontos amostrados */
  if(sample_count < S AMPLES) {
    V[sample_count] = filteredV;
    I[sample_count] = filteredI;

    /* Incrementa contagem dos pontos */
    sample_count += 1;
  }
}
```