

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO PEREIRA DE FARIA

EDUARDO CORREA

LUÍS PAULO CUSTÓDIO

RICARDO PIETRASKO

**SISTEMA COMUTADOR EM TRANSFORMADORES OPERANDO A
VAZIO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

CURITIBA

2022

EDUARDO PEREIRA DE FARIA
EDUARDO CORREA
LUÍS PAULO CUSTÓDIO
RICARDO PIETRASKO

**SISTEMA COMUTADOR EM TRANSFORMADORES OPERANDO A VAZIO
EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA
2022

RESUMO

As instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição estão cada vez mais frequentes, em termos de micro e mini geração. A etapa inversora é empregada em conexões entre o sistema elétrico de distribuição e o sistema fotovoltaico, podendo ser sistemas monofásicos ou trifásicos, dependendo da potência instalada do sistema. No Brasil, existem duas tensões oficiais de distribuição de energia: em 127 V e 220 V eficazes de fase (tensões monofásicas), e esta diferença impacta na construção dos equipamentos elétricos e eletrônicos fabricados no país para determinadas regiões. Tratando-se dos inversores para sistemas fotovoltaicos, eles são, em sua maioria, projetados para operar em tensões de 220 V/380 V de tensão de fase e de linha, respectivamente. Para outras regiões, nas quais as tensões das concessionárias de energia são 127 V/220 V, de tensão de fase e de linha, respectivamente, nestes casos, são empregados transformadores abaixadores para adequar a tensão fornecida pelo inversor para a rede elétrica. O emprego destes transformadores, para este tipo de conversão, gera perdas que são inerentes de seu funcionamento, e mais especificamente, quando operam em vazio (principalmente nos períodos noturnos, em que a conversão de energia solar é nula), resultando em menores eficiências no sistema fotovoltaico completo. Estima-se que as perdas no período noturno podem chegar a 10% em relação à energia produzida mensalmente no sistema fotovoltaico da instalação. Este trabalho propõe um equipamento de comutação automático, por meio de sensores de corrente e de tensão, detectam a operação em vazio dos transformadores, desconectando-os do circuito, sendo possível verificar uma redução das perdas totais com esta aplicação.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico. Transformadores operando em vazio. Inversor. Sistema de desligamento.

ABSTRACT

Photovoltaic systems connected to the distribution grid are increasingly frequent, in terms of micro and mini generation. The inverter stage is used in connections between the electrical distribution system and the photovoltaic system, which can be single-phase or three-phase systems, depending on the installed power of the system. In Brazil, there are two official power distribution voltages: 127 V and 220V effective phase (single-phase voltages), and this difference impacts the construction of electrical and electronic equipment manufactured in the country for certain regions. In the case of inverters for photovoltaic systems, they are mostly designed to operate at voltages of 220 V and 380 V of phase and line voltage, respectively. For other regions, in which the voltages of the energy concessionaires are 127 V and 220 V, of phase and line voltage, respectively, in these cases step-down transformers are used to adapt the voltage supplied by the inverter to the electrical grid. The use of these transformers, for this type of conversion, generates losses that are inherent to their operation, and more specifically, when they operate in no-load (mainly at night, when the conversion of solar energy is null), resulting in lower efficiencies in the complete photovoltaic system. It is estimated that losses at night can reach 10% in relation to the energy produced monthly in the photovoltaic system of the installation. This work proposes an automatic switching equipment, by means of current and voltage sensors, detect the no-load operation of the transformers, disconnecting them from the circuit, being possible to verify a reduction of the total losses with this application.

Keywords: Photovoltaic system. Transformers operating in no-load. Inverter. Shutdown system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - TENSÕES ELÉTRICAS POR MUNICÍPIO NO BRASIL.....	10
FIGURA 2 - DIAGRAMA VETORIAL DAS CORRENTES NO TRANSFORMADOR.....	12
FIGURA 3 - ESQUEMA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E DO SISTEMA DE DESLIGAMENTO.....	14

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	6
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	6
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	7
1.3. JUSTIFICATIVA	8
1.4. HIPÓTESE	8
1.5. OBJETIVO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. TENSÕES ELÉTRICAS NO BRASIL	10
2.2. TRANSFORMADORES	11
2.2.1. OPERAÇÃO EM VAZIO	11
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	13
3.1. FUNCIONAMENTO	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5. CONCLUSÕES	16
5.1. Sugestões de trabalhos futuros	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17

1. INTRODUÇÃO

A introdução deste trabalho foi separada em tópicos para contextualizar a problemática do tema e a solução proposta.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As instalações fotovoltaicas vêm ganhando espaço em residências, indústrias, comércios e até mesmo, em pequenas usinas de energia. Um dos principais componentes destes sistemas é o inversor, sendo o responsável pela conversão de energia solar fotovoltaica, captada pelos módulos fotovoltaicos.

Esta energia captada pelos módulos fotovoltaicos possui a característica de corrente elétrica contínua (CC). Este tipo de corrente é utilizado em equipamentos que demandem esta corrente contínua para o seu funcionamento (por exemplo, carregar baterias, ligar pequenos eletrodomésticos e motores em CC).

Contudo, para que esta energia faça parte de uma instalação elétrica, ela deve ser convertida para corrente alternada (CA), sendo este tipo de corrente utilizada nas instalações elétricas e nas redes de distribuição e para acionar diversos equipamentos e eletrodomésticos. A corrente e a tensão elétrica alternada possuem duas principais características: a amplitude do sinal (senoidal) e a frequência.

No Brasil, a frequência adotada é de 60 Hz em todo sistema elétrico (diferentemente do Paraguai, onde a frequência adotada é de 50 Hz). Entretanto, a amplitude da tensão elétrica pode variar no território brasileiro. Existem regiões em que a tensão é de 220 Volts (valor eficaz e de fase, ou seja, em relação ao neutro) e 380 V (tensão entre as fases, ou seja, de linha), porém existem outras regiões que os valores das tensões de fase e de linha são 127 V e 220 V de fase e de linha, respectivamente.

Esta diferença advém de momentos na história da eletrificação do Brasil, em que algumas regiões adquiriam geradores e equipamentos dos Estados Unidos (em que a tensão era de 110/127 V), e outras regiões importavam equipamentos da Europa (sendo que os equipamentos europeus, a tensão de funcionamento era de 220/240 V).

Devido a estas diferenças de tensões, a fabricação dos equipamentos teve que ser ajustada para atender todas as regiões. Existem os equipamentos que possuem chaves de seleção de tensão 127/220 V, porém nem sempre é possível este ajuste. Em determinados tipos de equipamentos, o projeto modifica os componentes internos

e inviabilizando em deixá-los “bivolts” (nomenclatura coloquial para representar equipamentos que podem funcionar nas duas tensões).

Trazendo esta situação para os inversores dos sistemas fotovoltaicos, diversos modelos de inversores foram projetados para tensões de 220/380 V, e desta forma, inviabiliza o uso destes inversores nas regiões onde as tensões são de 127/220 V.

Os inversores projetados em 220/380 V são usados em diversas partes do mundo, e por isso quando são importados para o Brasil, e nas regiões de 127/220 V, estes equipamentos necessitam de adequação da tensão para serem conectados nas redes elétricas. Esta adequação é realizada por meio do uso de transformadores, que são equipamentos estáticos, formados por enrolamentos (bobinas) primários e secundários (podendo ter diversos enrolamentos em uma mesma estrutura), e que promovem a redução desta tensão dos inversores de 220/380 V para 127/220 V.

Desta maneira, o problema das diferenças entre tensões fica resolvido. Contudo, o uso destes transformadores em momentos nos quais ele opera em vazio, ou seja, sem a carga projetada para o uso contínuo, o equipamento não possui um modo operante desligado, mas sim, consome uma corrente de magnetização de seu núcleo, que se comparada à corrente nominal, tem pouca relevância (dependerá também de como foi projetado o transformador e sua potência nominal). Mas mesmo com pouco consumo de energia no seu estado “desligado”, esta corrente, ao longo de um período de um mês por exemplo, pode se tornar um grande problema de consumo e de perdas no sistema em que eles estão instalados.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A problemática do tema trata-se da operação em vazio dos transformadores de um sistema fotovoltaico, principalmente no período noturno, no qual não há conversão de energia relevante para a rede elétrica.

Neste cenário, os transformadores estariam conectados, porém consumindo uma corrente mínima de magnetização, aquecendo o núcleo de ferro e por consequência, gerando perdas, que no primeiro momento são pequenas, embora se analisadas em um período maior (por exemplo em um mês de uso), esse valor acumulado pode ser bem representativo para a instalação.

Além destas perdas para o sistema elétrico, se for analisar o tempo de retorno do investimento (em inglês, *payback*) ele acaba se tornando maior, pois não foi considerado nos cálculos estas perdas referentes ao uso contínuo dos transformadores.

1.3. JUSTIFICATIVA

As perdas no sistema elétrico de distribuição acarretam perdas financeiras não somente para as concessionárias, mas também para todos os consumidores, deteriorando a qualidade da energia elétrica.

Buscar implementações e artifícios para atenuar ou mesmo mitigar estas perdas, promovem o senso de eficiência energética nas instalações e conseqüentemente, uma redução significativa nos valores das tarifas de energia, além de preservar a vida útil dos equipamentos transformadores.

1.4. HIPÓTESE

As instalações de sistemas fotovoltaicos que utilizam transformadores para adequar a tensão fornecida pelo inversor para a rede elétrica geralmente são conexões fixas e o sistema opera o tempo inteiro com os transformadores conectados.

Da mesma forma que existem comutadores para os bancos de capacitores (que são comumente empregados em sistemas industriais que possuem baixo fator de potência e cargas com características altamente indutivas), estes transformadores, quando operam em vazio, ou seja, sem cargas, eles ainda possuem perdas magnéticas e de efeito Joule, mesmo que aparentemente menores, entretanto, se somadas em um período prolongado, estes efeitos bem evidentes.

Atualmente no mercado existem inversores monofásicos e trifásicos para ambas tensões de distribuição no Brasil, porém os equipamentos que operam com tensões de 127 V (fase) e 220 V (linha), são equipamentos maiores e mais caros, pois os valores de corrente circulantes nestes inversores são maiores se comparados aos modelos de 220 V (fase) e 380 V (linha), acarretando em componentes e fiações mais robustos para suportar estes níveis de corrente e isolamento.

1.5. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento capaz de realizar o ligamento e desligamento automático dos transformadores operando em vazio em um circuito elétrico com sistema fotovoltaico em sua instalação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica são apresentados conceitos de base para a compreensão dos assuntos e conceitos abordados.

2.1. TENSÕES ELÉTRICAS NO BRASIL

No Brasil, as tensões nominais, aplicadas aos sistemas de distribuição secundários das concessionárias de energia elétrica, variam em função da região, conforme a Figura 1. No Nordeste, a tensão padronizada é de 380 V entre fases e de 220 V entre fase e neutro. Já na Região Sul, a tensão convencionalmente utilizada é de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro. No entanto, em alguns sistemas isolados, são aplicadas tensões diferentes destas, como, por exemplo, a de 110 V, na qual a tensão é resultante da metade do enrolamento de um transformador de 220 V.

FIGURA 1 - TENSÕES ELÉTRICAS POR MUNICÍPIO NO BRASIL.



FONTE: BRASIL, TENSÕES POR MUNICÍPIO (2022).

Para que os aparelhos consumidores de energia elétrica sejam utilizados com segurança pelos usuários, é necessário que se faça sua alimentação com tensões adequadas, normalmente inferiores a 500 V.

2.2. TRANSFORMADORES

Transformador é um equipamento de operação estática que por meio de indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos denominados, respectivamente, secundário e terciário, sendo, no entanto, mantida a mesma frequência, porém com tensões e correntes diferentes.

Em um sistema elétrico, os transformadores são utilizados desde as usinas de produção, onde a tensão gerada é elevada a níveis adequados para permitir a transmissão econômica de potencial, até os grandes pontos de consumo, onde a tensão é reduzida a nível de subtransmissão e de distribuição, alimentando as redes urbanas e rurais, onde novamente é reduzida para, enfim, ser utilizada com segurança pelos usuários do sistema, conforme já mencionado.

2.2.1. OPERAÇÃO EM VAZIO

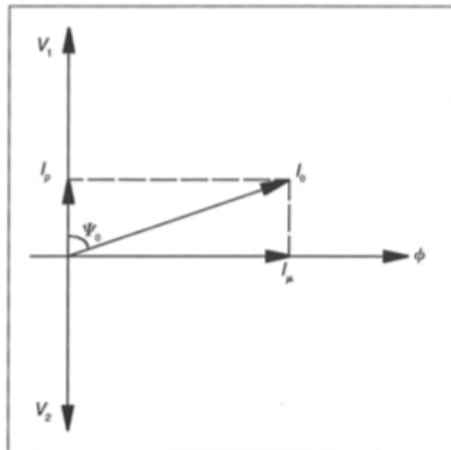
Quando um transformador está energizado e não há nenhum aparelho consumidor ligado ao seu enrolamento secundário, diz-se que opera em vazio. Neste caso, uma tensão V_1 , é aplicada ao seu enrolamento primário, fazendo aparecer no enrolamento secundário uma tensão V_2 . Dessa forma, no enrolamento primário circulará uma corrente I_0 , denominada corrente em vazio.

Conforme o diagrama da Figura 2, esta corrente poderá ser decomposta em dois componentes, sendo I_μ a corrente responsável pela magnetização do núcleo, enquanto I_p a corrente que o transformador absorve da rede de alimentação para suprir as perdas internas, devido as correntes parasitas ou de Foucault e as perdas por histerese. Os valores de I_μ e I_p são expressos de acordo com as equações abaixo:

$$I_p = I_0 \times \cos \psi_0$$

$$I_\mu = I_0 \times \sin \psi_0$$

FIGURA 2 - DIAGRAMA VETORIAL DAS CORRENTES NO TRANSFORMADOR.



FONTE: FITZGERALD (2014).

A corrente I_0 é normalmente muito pequena e, em geral, atinge cerca de 8% da corrente primária com o transformador a plena carga. Já a corrente I_p pode variar entre 2 e 15% do valor da corrente I_0 valor este que depende da qualidade da chapa utilizada na fabricação do núcleo. Para muitas considerações práticas, o valor de I_0 é tomado igual a I_μ . O cosseno do ângulo ψ_0 representa o fator de potência do transformador em operação em vazio, e é normalmente muito pequeno, em virtude do valor elevado deste ângulo, ou seja:

$$F_{p0} = \cos \psi_0$$

Em operação em vazio do transformador, define-se intensidade de campo magnético H_0 como o valor da corrente elétrica de excitação I_0 que circula numa determinada quantidade de espiras primárias N_1 , cujo comprimento total mede L_m , envolvendo o núcleo do transformador. Pode ser dada pela equação abaixo:

$$H_0 = \frac{I_0 \times N_1}{L_m}$$

H_0 - Intensidade de campo magnético, em ampères X espiras/m.

Finalmente, a potência absorvida da rede por um transformador monofásico em operação em vazio pode ser determinada a partir da equação abaixo:

$$P_1 = V_1 \times I_0$$

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

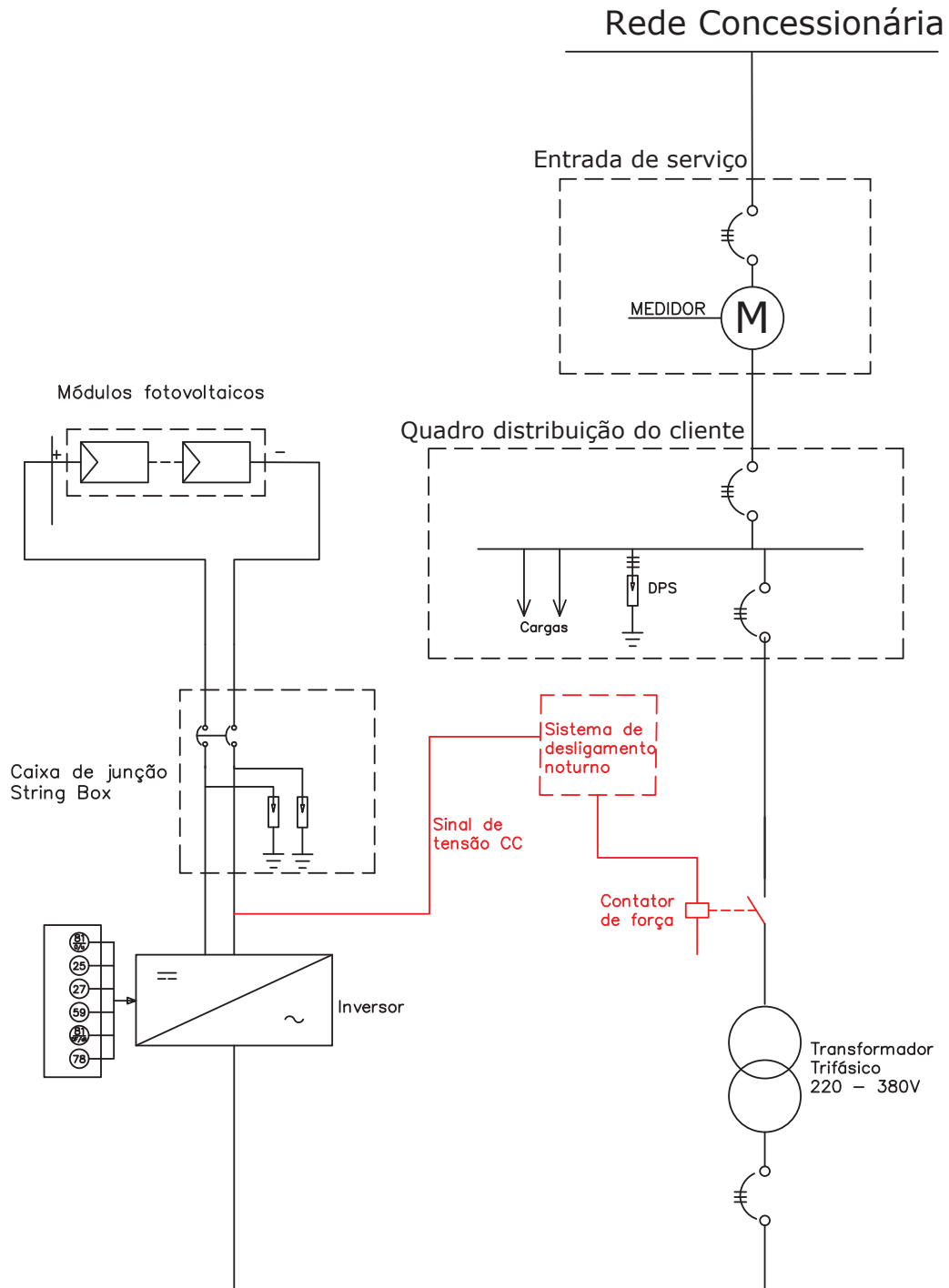
Como observado, as perdas em transformadores operando em vazio são muito significativas, a grande maioria dos inversores fotovoltaicos acima de 15 kW possuem a saída para conexão com a rede elétrica em 380 volts trifásico e a maioria das residências e empresas do Brasil utilizam a rede elétrica em 220 V, havendo então a necessidade do uso de transformadores 380V para 220V (linha). Pensando nisso, foi desenvolvido um sistema para efetuar o desligamento durante a noite destes transformadores.

3.1. FUNCIONAMENTO

O sistema microcontrolado irá monitorar por meio de sensores a existência de tensão e corrente contínua no(s) cabo(s) que interligam os painéis fotovoltaicos ao inversor, quando o dia amanhecer os painéis começarão apresentar tensão nos cabos e o sistema irá perceber essa tensão e acionar uma saída do mesmo, nessa saída estará ligado um contator que irá acoplar o transformador a rede elétrica CA, e ao anoitecer os cabos dos painéis não apresentarão tensão, fazendo com que o sistema se desligue.

No esquema da Figura 3 é visto como será feita essa conexão em vermelho do sistema de desligamento.

FIGURA 3 - ESQUEMA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO E DO SISTEMA DE DESLIGAMENTO



FONTE: Autoria própria (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por exemplo, para um transformado trifásico de 40 kVA 380/220V, a corrente no secundário a plena carga seria de $I = (40 \text{ kVA} / (220 \text{ V} * 1,73)) = 105,1\text{A}$. Calculando 8% deste valor (pior caso), teremos uma corrente a vazio $I_0 = 8,41\text{A}$.

Utilizando a formula acima podemos calcular a potência a vazio consumida pelo transformador, temos $P = 220\text{V} * 8,41\text{A} * 1,73 = 3,2 \text{ kVA}$. Assumindo que o fator de potência seja igual a 1, teremos uma potência de 3,2 kW sendo consumida pelo secundário.

Calculando a energia consumida em período noturno por um transformador utilizado em um sistema fotovoltaico, estimando-se 10 horas sem sol, teríamos um valor de $E = P * t = 3,2 \text{ kW} * 10\text{H} = 32 \text{ kWh}$. Assumindo este valor para um mês (30 dias) teremos um total de 960 kWh de perdas.

Para efeito de exemplo, um sistema fotovoltaico deste porte, na cidade de Curitiba - PR, gera em média 4800 kWh mensais (teoricamente). Assim, temos uma perda que chega a 20% da energia apenas no transformador.

Mesmo considerando uma perda conservadora no transformador, da ordem de 2% (de acordo com FITZGERALD (2014)), teríamos uma perda de 240 kWh no sistema, ou 5%. Vale o lembrete que o autor considera esta perda para transformadores de grande porte (da ordem de MVA de potência). Numericamente parece "pouco", mas temos que considerar que queremos gerar energia, e qualquer perda terá um impacto no sistema.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de avaliar um equipamento que fosse de simples implementação em qualquer instalação fotovoltaica que utilize transformadores abaixadores para adequar a tensão de saída do inversor para a rede elétrica local.

O uso de sensores de tensão e corrente foram empregados para determinar se o transformador estaria operando em vazio, e assim, desconectando-o do circuito por meio de contadores, durante o período noturno, evitando desta maneira que os transformadores fossem fontes de perdas no sistema elétrico. Observou-se também que um transformador que opera em vazio em longos períodos, pode acarretar uma perda total significativa no sistema elétrico.

Por fim, foi apresentada esta proposta de uma solução simples e eficaz que deve atender a esta demanda e que possivelmente poderá ser integrada nos inversores das próximas gerações.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

No desenvolvimento deste trabalho surgiram algumas ideias que foram sugeridas para trabalhos futuros, tais como:

- Implementação de um sistema conectado por meio de rede Wi-Fi ou mesmo integrado em arquitetura IoT (*Internet of Things*) existente na instalação;
- Um sistema supervisor com atuadores comandado por CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) já existentes na instalação;
- Criação de aplicações em dispositivos móveis (*App* para sistemas Android e IOS) para acompanhar e também controlar o equipamento de forma remota.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAXIMANDRO OLÍMPIO DE OLIVEIRA. Perdas nos transformadores operando a vazio em sistemas fotovoltaicos. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/perdas-nos-transformadores-operando-vazio-em-sistemas-anaximandro/>>. Acesso em: 15 de abril de 2021.

BRASIL, TENSÕES POR MUNICÍPIO. Disponível em <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Brasil,_Tens%C3%B5es_Por_Munic%C3%ADpio.svg>. Acesso em: 7 de novembro de 2021

FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. Máquinas Elétricas com introdução à eletrônica de potência. 7° ed. AMGH, 2014.

MAMEDE FILHO, JOÃO. Manual de equipamentos elétricos. 4° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

VILLALVA, MARCELO & GAZOLI, JONAS & GUERRA, JUAREZ. Energia Solar Fotovoltaica - Sistemas Conectados à Rede Elétrica: requisitos para a conexão e proteções. Erica, 2013.