MARCOS VINICIUS SCHLICHTING

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA INDUTIVO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA FINS AGROINDUSTRIAIS

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO 2015

MARCOS VINICIUS SCHLICHTING

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA INDUTIVO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA FINS AGROINDUSTRIAIS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Reinaldo Aparecido Baricatti.

COORIENTADOR: Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
MARÇO 2015

S344m Schlichting, Marcos Vinícius

Avaliação de um sistema indutivo para aquecimento de água para fins agroindustriais. / Marcos Vinícius Schlichting. Cascavel /PR, 2015. 58 f.

Orientador: Reinaldo Aparecido Baricatti

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Aquecimento de água. 2. Correntes de Foucault. 3. Imãs permanentes. I. Baricatti, Reinaldo Aparecido. II. UNIOESTE. III. Título.

CDD: 621.402

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca UTFPR / Toledo

MARCOS VINÍCIUS SCHLICHTING

"AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA INDUTIVO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA FINS AGROINDUSTRIAIS"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer
Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Toledo

Cascavel, 12 de março de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter conseguido vencer mais essa etapa com saúde e paz.

A minha mãe Anna de Lima, meus irmãos e familiares que de alguma forma sempre me apoiaram e incentivaram.

Aos professores Reinaldo Aparecido Baricatti e Carlos Eduardo Camargo Nogueira, orientador e coorientador respectivamente, pela disposição e paciência empregadas nesse desafio.

Aos amigos sempre presentes, em especial a Tatiane Martins de Assis pela companhia e ajuda prestada durante o período do mestrado.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela liberação da carga horária de jornada de trabalho, para que eu pudesse frequentar as aulas e realizar os estudo, bem como o apoio técnico e com equipamentos.

A todo corpo docente e colaboradores do programa de mestrado de Engenharia de Energia na Agricultura da UNIOESTE, pelo conhecimento repassado, auxilio prestado e oportunidades criadas.

Aos senhores Raimundo (Chico torneiro) da empresa Tornearia Irmãos Helermam e Sergio da empresa Metal Arte, pela ajuda na construção do protótipo utilizado neste estudo.

SCHLICHTING, Marcos Vinicius. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março 2015. **Avaliação de um sistema indutivo para aquecimento de água para fins agroindustriais**. Professor Orientador: Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti.

RESUMO

O presente trabalho avaliou um protótipo para aquecimento de água para uso na agroindústria, baseado no princípio da indução magnética para geração de energia térmica através das correntes de *Foucault* associado a uma fonte de energia mecânica para variação do fluxo magnético produzido por imãs permanentes, configurado com quatro e seis imãs com e sem inversão de polos, em comparação com o aquecimento de água feito através de um sistema resistivo. Os sistemas induzidos obtiveram rendimento de 64,74 %, 65,13 % e 64,48 % para seis imãs sem inversão (6ISI), quatro imãs com inversão (4ICI) e quatro imãs sem inversão (4ISI) respectivamente. O sistemas resistivo apresentou eficiência de 89,21%, demonstrando maior viabilidade nas condições do estudo.

Palavras chave: Aquecimento de água, Correntes de *Foucault*, Imãs permanentes.

SCHLICHTING, Marcos Vinicius. MSc, University of the West of Paraná, in March 2015. **Evaluation of an inductive system for heating water for agroindustrials purposes**. Coordinating Professor: Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti.

ABSTRACT

This study evaluated a prototype for heating water for use in the agricultural industry, based on the principle of magnetic induction to generate thermal energy through the eddy currents associated with a mechanical energy source for variation of magnetic flux produced by permanent magnets, configured with four six magnets with and without pole reversal, as compared with the water heating done through a resistive system. Induced systems obtained yield 64.74%, 65.13% and 64.48% for six magnets without inversion (6ISI), four magnets with reverse (4ICI) and four magnets without inversion (4ISI) respectively. The resistive system showed 89.21% efficiency, demonstrating greater viability in the study conditions.

Keywords: Water heating, Eddy currents, Permanent magnets .

ÍNDICE

RESUMO iv

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVO 2

2.1 Objetivo geral 2
2.2 Objetivos específicos 2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

3.1 Utilização de água quente na agricultura 3
3.2 Sistema elétrico para aquecimento de água 4
3.3 Sistema solar para aquecimento de água 4
3.4 Reservatórios térmicos para armazenamento de água 5
3.5 Fonte de energia auxiliar para reservatórios térmicos 5
3.6 Lei de Lenz 6
3.7 Lei de Faraday 6
3.8 Correntes de Foucault 7
3.9 Magnetismo e comportamento magnético 10

3.9.1 Diamagnetismo 10

3.9.2 Paramagnetismo 11

3.9.3 Ferromagnetismo 11

4. MATERIAL E MÉTODOS 13

4.1 Materiais utilizados para a construção do sistema de aquecimento 13
4.2 Materiais utilizados para a avaliação dos sistemas de aquecimento 19
4.3 Métodos 21

4.3.1 Avaliação do Sistema de Aquecimento 21

4.3.2 Cenário 1 23

4.3.3 Cenário 2 27

4.3.4 Cenário 3 29

4.4 Cálculos das eficiências 30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 32

6. CONCLUSÃO 44

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS 45

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

1. INTRODUÇÃO

A utilização da água nos processos de manufatura, industriais, agroindustriais e residenciais, requer grande demanda energética, pois comumente é empregada em altas temperaturas.

Sistemas de aquecimento que demandem de menor consumo energético e ou associados a fontes de energia renováveis possibilitam economia de recursos econômicos e naturais.

O setor agroindustrial é base da cadeia produtiva do país e grande consumidora de água e energia; extremamente sensível às variações de custos de produção, pois reflete diretamente no custo de vida da população.

O emprego de estratégias para redução de custos voltados ao consumo de energia, como a utilização da biomassa, da energia solar, geração distribuída entre outros; apresentam-se como soluções tecnicamente viáveis.

Sistemas de aquecimento baseados na indução magnética são amplamente utilizados na industria de transformação metal mecânica para a fusão de metais, tratamento térmico, têmpera, entre outros. Apresenta-se com uma solução eficiente para reduzir o consumo de energia.

Existe no mercado alguns sistemas de aquecimento para fluídos, que apresentam alta eficiência e menor consumo de energia quando comparado aos sistemas de aquecimento resistivos para mesma finalidade.

Dessa forma, considerando o montante ambiental e financeiro empregado para o aquecimento de água no setor agrícola, o desenvolvimento dessa tecnologia pode render bons frutos ao setor agrícola no que tange o consumo de energia.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade da utilização de um sistema de aquecimento indutivo baseado na dissipação térmica das correntes de *Foucault* para substituição da resistência elétrica em sistemas de aquecimento de água, utilizando-se de imãs permanentes dispostos em diferentes quantidades e polaridades, comparando a energia elétrica consumida para movimentação dos imãs e consequente variação do fluxo magnético, com o sistema convencional que utiliza resistência elétrica.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o sistema de aquecimento por correntes de *Foucault*, utilizando um motor elétrico para variação do campo magnético gerado por imãs permanentes em 4 diferentes configurações, com quatro imãs, seis imãs, com e sem inversão de polos;

- Comparar a energia elétrica consumida nos sistemas em estudo com sistema convencional resistivo;

- Calcular a eficiência energética dos sistemas em estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Utilização de água quente na agricultura

Segundo Jordan et al (2004), o processamento do leite requer um grande consumo de água quente com temperatura em torno de 50 a 60 °C, para limpeza e desinfecção dos sistemas de ordenha, pasteurização e resfriamento.

A água utilizada para o pré aquecimento do leite na pasteurização é esquentada através de um aquecedor elétrico de acumulação a 60 °C, para posteriormente ser elevado à temperatura de 76 °C em um aquecedor de passagem, sendo resfriado para 4 °C utilizando banco de gelo como fonte térmica (BALDASSIN et al 2004).

Para produção de fios de seda é necessário um processo de dissolução da substancia sericina presente nos casulos, que acontece em meio aquoso, aquecido entre 60 °C e 120 °C. A energia para aquecimento da água utilizada no processo, é proveniente da queima da lenha e energia elétrica (NASCIMENTO e BIAGGIONI, 2010).

Evaristo e Figueiredo (2008), relatam que grande parte dos processos industriais e agroindustriais dependem da energia térmica, calor ou frio. Quando trata-se de produção de calor, os principais dispositivos empregados são caldeiras de aquecimento, caldeiras de vapor, caldeiras de co-geração, fornos e secadores. O objetivo é transportar calor para um dado processo e sob forma de fluido, seja ar, vapor, água, óleo, etc. A energia primária, que pode ser provinda da queima de carvão, gás, óleo ou elétrica é considerada de extrema relevância quanto à influencia na composição de custos.

Silva, Oliveira-Napoleão e Falcão (2001), utilizaram vapor de água para desinfecção de substrato para produção de mudas de hortaliças, em substituição a gás brometo de metila como agente desinfetante, através de um evaporador de baixa pressão.

3.2 Sistema elétrico para aquecimento de água

Mais utilizado em residências, os chuveiros e torneiras elétricas são aquecedores de passagem instalado na própria peça de utilização. Devido ao aquecimento imediato da água antes do consumo, a potência do chuveiro elétrico é bem superior a dos "boilers". Uma vez ligado com uma dada regulagem (inverno ou verão), o chuveiro elétrico tem o consumo de energia elétrica independente da vazão, sendo o calor não absorvido pela água dissipado para o ambiente (MOREIRA, 1985).

O "boiler" é um sistema de aquecimento de água que acumula a massa de água a ser aquecida. O aquecimento é feito através de uma resistência elétrica controlada por um termostato que a aciona de modo a manter a temperatura da água dentro do ajuste pré-determinado. Os "boilers" apresentam perdas energéticas em forma de calor em torno de 20% a 30%, em função das características do isolamento térmico empregado e rendimento entre 70% e 80% (MATAJS e FAGÁ, 1996).

Segundo Pollis et al (1995) apud Baptista (2006), os aquecedores de passagem centrais são equipamentos de aquecimento duas vezes mais potentes aproximadamente, que os chuveiros elétricos. Podem ser capazes de atender vários pontos de um banheiro e tem o custo de instalação dez vezes superior devidas tubulações exclusivas e isolamentos térmicos.

3.3 Sistema solar para aquecimento de água

Um sistema solar de aquecimento de água é composto basicamente de um coletor solar, onde se verifica a conversão da energia solar em energia térmica, um reservatório termicamente isolado e a respectiva tubulação de alimentação do sistema e distribuição de água quente. Os coletores solares têm em média uma vida útil de 20 anos (BAPTISTA, 2006).

A energia solar para aquecimento está já bem desenvolvida e testada para aquecimento de água em residências. Ela é ainda de pouca aplicação na agroindústria, embora já existam experiências de sucesso em outros países. Na

Índia existe uma instalação industrial para processamento de ovos com o aquecimento de água solar e complementado por aquecimento com óleo combustível que fornece 110.000 l/dia de água a 85 ºC (NAGARAJU et al 1999).

A escolha do tipo de energia auxiliar em sistemas de aquecimento solar recai justamente sobre a eletricidade por sua facilidade de controle e baixo investimento inicial. O custo da energia elétrica, contudo, é hoje alto o suficiente para que a fração elétrica no consumo de energia do sistema seja importante e passe a merecer mais atenção. (VIEIRA, 2001)

3.4 Reservatórios térmicos para armazenamento de água

O reservatório de água quente tem o funcionamento muito dinâmico, pois recebe, armazena e cede calor a taxas variáveis ao longo do tempo. O calor recebido provém do coletor solar e da fonte auxiliar de energia; o cedido inclui as perdas para o ambiente, o consumo de água quente e possível circulação da água nos coletores, quando este último está com temperatura abaixo daquela do reservatório (ARRUDA, 2004).

O boiler possui resistência elétrica que aquece a água em dias em que não há luz solar suficiente. Comandada por um termostato, ela liga e desliga de acordo com a temperatura da água (PANESI, 2001).

Nos sistemas de aquecimento de água por energia solar o reservatório térmico pode ser considerado como o coração do sistema, pois tanto a água quente vinda dos coletores como do aquecedor auxiliar convergem para ele. Para que a água contida no reservatório não libere calor para o ambiente devem ser utilizados reservatórios com baixo coeficiente global de perdas térmicas (AITA, 2006).

3.5 Fonte de energia auxiliar para reservatórios térmicos

O sistema de aquecimento solar de água não é projetado para fornecer 100% da demanda de água quente. Caso fosse adotado esse critério, o dimensionamento das placas e do tanque deveria ser feito para pior situação possível, na qual ter-se-ia em conta o tempo mais frio e nublado para uma dada região. Este dimensionamento resultaria em sistema superdimensionado para maior

parte do tempo de utilização. Por isso, o sistema solar é projetado para suprir entre 50 a 70% da demanda global de aquecimento (FISH, GUIGAS E DALENBACK 1998).

A segunda fonte de calor pode ser elétrica, a gás ou uma bomba de calor ligada em série. Esta fone pode estar localizada internamente ou externamente ao reservatório. Quando externa, pode ser de passagem ou de acumulação, sendo mais usual a primeira. (ARRUDA, 2004).

Segundo Aita (2006) Nos dias em que a energia disponível pelo sol não é suficiente, é preciso utilizar uma fonte de energia auxiliar, que pode ser resistência elétrica ou aquecedor de passagem a gás (aquecedor auxiliar). O primeiro tipo é o mais utilizado, pois apresenta um menor investimento inicial, porém em longo prazo o custo torna-se maior.

3.6 Lei de Lenz

Segundo Young (2004, p. 281) a lei de Lenz afirma que "o sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz esse efeito". A causa pode ser um fluxo que varia de um circuito em repouso produzido pela variação de um campo magnético, um fluxo magnético variável gerado pelo movimento relativo de condutores que compõem o circuito ou qualquer outra combinação que produza variação do fluxo magnético.

A origem do diamagnetismo está na variação do momento angular orbital dos elétrons induzida pela aplicação do campo externo. A explicação clássica deste fenômeno vem da lei de Lenz, pela qual uma variação de campo magnético resulta em uma corrente elétrica induzida, que tende a se opor a esta variação, isto é, criando um campo oposto ao aplicado (RODRIGUES, 1998).

3.7 Lei de Faraday

O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito. A força eletromotriz (fem) em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético através da área delimitada pela espira (YOUNG, 2004).

O princípio de indução eletromagnética foi descoberto por Michael Faraday em 1831. Faraday comprovou que uma corrente que varia a sua intensidade em função do tempo, ao passar ao longo de uma espira, induz uma corrente elétrica em uma espira adjacente (CURTINAZ, 2012).

No entanto, somente no final de 1870, o engenheiro britânico Sebastian de Ferranti começou experimentos aplicando a teoria de Faraday para aquecimento de metais. Em 1890, Edward Allen Colby patenteou o primeiro forno de indução para derretimento de metais. O primeiro uso prático foi em 1900 em Gysinnge (Suécia) por Kjellin. O primeiro forno de indução trifásico foi construído na Alemanha, em 1906, por Röchling-Rodenhauser. Em 1907, foi produzido o primeiro aço em um forno de indução nos Estados Unidos (GANDHEWAR, BANSOD E BORADE, 2011).

3.8 Correntes de Foucault

As correntes parasitas são geradas durante os ciclos de magnetização sob campos magnéticos alternados. Sua intensidade é a função da frequência do campo magnetizante, resultando em maiores perdas, quanto maior for à frequência do ciclo (CASTRO, RODRIGUES E LANDGRAF, 2002).

Segundo Filardo (2003), em seu estudo sobre perdas magnéticas, relata que às correntes de *Foucault* produzem calor pela ação das correntes elétricas que são induzidas em chapas de aço silício.

Dietrich, Chabu e Cardoso (2001), em seus estudos sobre freios magnéticos aborda o fato das correntes parasitas reduzir a eficiência dos dispositivos, pois o fenômeno converte a energia mecânica de movimento (linear ou rotativo) em calor. A interação entre a corrente induzida e o campo magnético que a gerou provoca o aparecimento de uma força de repulsão entre ambos. Se o meio tiver resistividade nula, a força não decairá com o tempo (o campo não penetra no material) e o sistema será conservativo. Caso a resistividade seja não nula – como ocorre na prática – haverá dissipação de potência no meio condutor devido às perdas de *Joule*, e o sistema será dissipativo.

O aquecimento por indução depende de dois mecanismos de dissipação de energia para fins de aquecimento. São as perdas de energia devido ao efeito *Joule* e as perdas de energia associadas à histerese magnética. O primeiro destes é o único mecanismo de geração de calor em materiais não magnéticos (por exemplo, alumínio, cobre, aços inoxidáveis e aço de carbono acima da temperatura Curie) e o principal mecanismo de aquecimento para metais ferromagnéticos (por exemplo, os aços de carbono abaixo da temperatura de Curie). O segundo mecanismo é menos importante, porém contribui para a geração de calor por indução para essa última classe de materiais (ZINN e SEMIANTIN, 1988).

A Figura 1, representa de que forma as correntes parasitas se comportam no material condutor submetido ao campo magnético variável, bem como as forças magnéticas que surgem devido à variação do campo que as originou, conforme lei de Lenz.

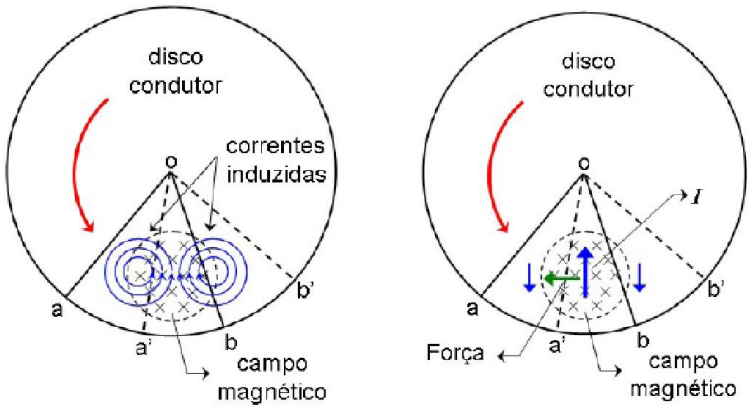

Figura 1 – Campo magnético, correntes induzidas e forças que atuam.

Fonte: SOUZA (2005).

Onde:

- As setas de cor vermelha representam o sentido de rotação do disco condutor;
- A seta de cor verde representa a força que contrapõe o movimento do disco através do campo magnético criado pelas correntes induzidas no material condutor, conforme a lei de Lenz;

- Na parte inferior do círculo, que representa o disco, existe um círculo tracejado e "hachurado" com cruzes, que representam o sentido do fluxo magnético, que neste caso está entrando no plano da folha;
- As setas em azul representam o sentido de movimento das correntes induzidas no disco;
- As letras a0b, e a'0b' representam a movimentação da área delimitada pelos pontos, pois nesse caso, a variação do fluxo magnético deu-se pelo movimento do disco.

Romanovsky e Mutale (2012) desenvolveram um dispositivo que transforma a corrente elétrica de baixa frequência em energia térmica para o aquecimento de água, induzindo de correntes de Foucault nas paredes do reservatório, fabricado a partir de material ferromagnético que desempenha um papel de núcleo de indutor e dissipador de energia térmica.

As características ferromagnéticas dos materiais do reservatório irão definir a temperatura de aquecimento das paredes do reservatório e, por conseguinte, a quantidade de energia transferida para a água por condução. Os mesmos autores ressaltam ainda, que a energia térmica acumulada pelo dispositivo de produção de calor e de armazenamento pode ser utilizada em diferentes processos tecnológicos industriais durante períodos de altos preços da energia (ROMANOVSKY e MUTALE, 2012).

Após análise em três modelos de aquecedores de ambiente indutivos com potência máxima de 1600 W para uso residencial, Popa e Pentuic (2012) concluíram que além da eficiência de aproximadamente 90 %, os dispositivos indutivos são mais seguros, apresentam menor custo de manutenção e podem representar uma solução para o aproveitamento das perdas de energia térmica em diversos dispositivos.

Técnicas de indução são usadas para o aquecimento da superfície de um material metálico em frequências na faixa de 50 Hz a 1 MHz. Eles são usados também para a fusão em frequências muito elevadas, na fabricação de materiais semicondutores e no trabalho a quente em vidros (JONES et al 2006).

3.9 Magnetismo e comportamento magnético

Os materiais magnéticos são classificados de acordo com o estado físico em que se apresentam, dentre os quais os mais comuns são os estados ferromagnético, paramagnético e diamagnético (LOURENÇO, 2011).

Suscetibilidade magnética (χ) - É a grandeza que caracteriza um material magnético segundo sua resposta a um campo magnético aplicado. Esta grandeza pode ser estática (dc) ou dinâmica (ac) (SANTOS, SANTOS e SOUZA, 2005).

Os fenômenos magnéticos são largamente utilizados no desenvolvimento de novas tecnologias, desde sistemas de geração e distribuição de energia (hidrelétricas, entre outros), sistemas de conversão eletromecânica (eletrodomésticos, automóveis), eletrônicos e de telecomunicações, transdutores, sensoriamento, prospecção geológica, informática, automação industrial até a medicina e a engenharia biomédica. Isto só foi possível com o entendimento dos fenômenos magnéticos e com a descoberta de novos materiais magnéticos. Fenômenos estes que são rigorosamente descritos pela mecânica quântica e pela mecânica estatística, mas que podem ser compreendidos em uma primeira análise utilizando-se de uma abordagem macroscópica, possibilitando assim a aplicação de conceitos de física clássica (RIBEIRO, 2000).

3.9.1 Diamagnetismo

Diamagnetismo em um geral corresponde ao tipo mais fraco de resposta magnética de um sistema, caracterizado por susceptibilidade negativa e da ordem de $Xm \sim 10^{-5}$ (SI) (o fato deste valor ser negativo é justificado pela Lei de Lenz: esta é uma lei que diz que um circuito submetido a um campo magnético externo variável, cria um campo contrário opondo-se a variação deste campo externo). O seu efeito é diminuir o módulo campo no interior do material (RIBEIRO, 2000).

O diamagnetismo ocorre em todos os materiais, pois todas as moléculas exibem um momento de dipolo magnético induzido e antiparalelo ao campo magnético aplicado em virtude da deformação da distribuição da corrente eletrônica. A sua magnetização tende a enfraquecer o campo externo. Geralmente o efeito

diamagnético nos materiais é mascarado pelo comportamento paramagnético e ferromagnético (CARNEIRO, TOUSO e BAFFA, 2003).

O diamagnetismo tem sua origem na interação de elétrons pareados com o campo magnético e é uma propriedade de toda a matéria, pois mesmo materiais paramagnéticos possuem níveis eletrônicos internos preenchidos (FRIEDERMANN, NUNES e SOARES, 2005).

3.9.2 Paramagnetismo

Paramagnetismo é o fenômeno que ocorre em materiais que possuem momentos magnéticos intrínsecos não interagentes entre si. Na ausência de campo magnético nestes materiais a magnetização é nula. Por isso, os materiais paramagnéticos têm susceptibilidade magnética positiva, com ordem de grandeza X entre 10^{-5}e 10^{-3}(SI) (RIBEIRO, 2000).

Os materiais paramagnéticos se caracterizam pelo fato de suas magnetizações, M, apresentarem resposta linear a um campo magnético, h, de baixa intensidade aplicado, ou seja, conforme Equação 01.

$$M = Xh, \qquad \text{(Eq.01)}$$

Onde X (X> 0) é a susceptibilidade magnética do material e h é o campo magnético aplicado. Os sistemas paramagnéticos mantêm uma magnetização não nula somente enquanto houver um campo externo aplicado, o que faz com que parte dos momentos magnéticos dos spins do sistema se alinhem paralelamente ao campo. Quando um sistema paramagnético não está sob influência de um campo externo, seus spins se orientam em direções aleatórias, fazendo com que o sistema possua magnetização total nula (LOURENÇO, 2011).

3.9.3 Ferromagnetismo

Alguns elementos do grupo de transição, como o ferro, níquel e cobalto puros ou em ligas com outros elementos, apresentam uma alta magnetização espontânea abaixo da temperatura de Curie (TC). Essa alta magnetização nos materiais ferromagnéticos está relacionada ao fato destes possuírem momentos de

dipolo magnético intrínsecos altamente interagentes que se alinham paralelamente entre si (RIBEIRO, 2000).

Na presença de um campo magnético, os materiais ferromagnéticos apresentam uma magnetização induzida que aumenta de acordo com a intensidade do campo aplicado. Porém, esses materiais têm uma propriedade intrínseca chamada magnetização de saturação. A magnetização de saturação, que é o valor máximo da magnetização que pode ser induzida no sistema. Ela independe do tamanho do mesmo, ocorrendo a partir de um valor específico da intensidade do campo magnético externo, que por sua vez independe da temperatura (LOURENÇO, 2011).

A magnetização de materiais ferromagnéticos é muito superior quando comparada à dos materiais paramagnéticos e diamagnéticos e não possui relação linear com o campo. A curva de magnetização não é função somente do tipo do material, mas do tipo de tratamento aplicado (SANTOS, SANTOS e SOUZA, 2005).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi totalmente prático e executado no laboratório de energia (LENE) da UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná/Campus-Cascavel.

4.1 Materiais utilizados para a construção do sistema de aquecimento

Os materiais utilizados para a avaliação do sistema de aquecimento foram os seguintes:

- Um reservatório de formato cilíndrico com capacidade aproximada de 20 litros, Figura 2.
- Confeccionado em alumínio, isolado termicamente com manta de amianto e espuma de poliuretano, Figuras 3 e 4.
- O reservatório também contou com suporte padronizado para possibilitar a troca dos sistemas de aquecimento.

Figura 2 - Reservatório em alumínio.

Figura 3 - Reservatório, detalhe do isolamento térmico.

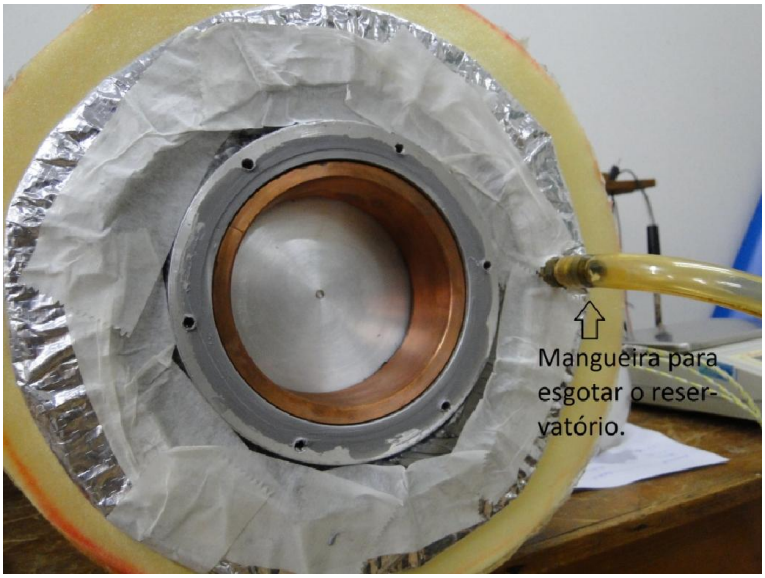

Figura 4 - Reservatório, detalhe do isolamento térmico

- Um cilindro com fundo fechado usinado em alumínio, com 125 mm de diâmetro externo, 120 mm interno e 60 mm de comprimento.
- Um cilindro de cobre confeccionado a partir de uma barra maciça, com 120 mm de diâmetro externo, 103 mm de diâmetro interno e 50 mm de comprimento que em conjunto com o cilindro de alumínio formaram o gerador/trocador de calor, Figura 5. Sendo instalado no fundo do reservatório.

- A escolha do cobre como material para geração das correntes de *Foucault* e consequente aquecimento foi devido às características intrínsecas do mesmo, como por exemplo, a permeabilidade magnética e o coeficiente de troca térmica.

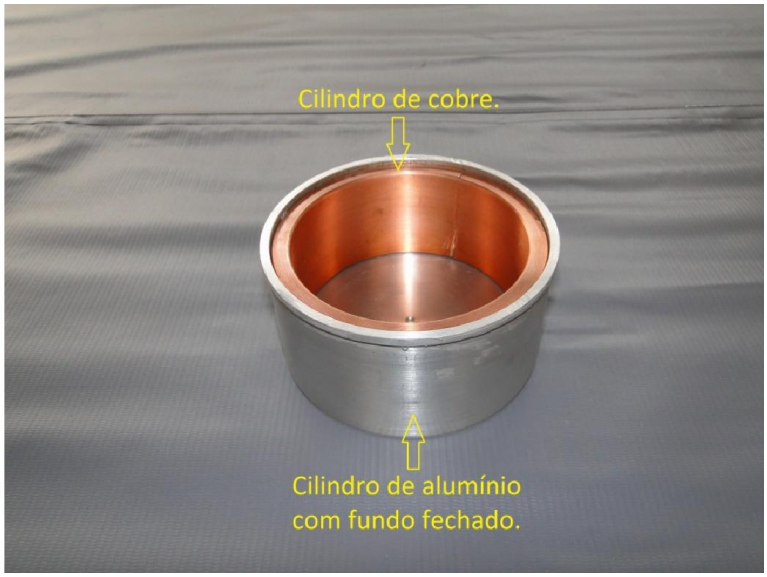

Figura 5 - Gerador/trocador de calor.

- Um rotor para alocação dos imãs permanentes confeccionado com 97 mm de diâmetro externo, 125 mm de comprimento total, ranhura para os imãs e alojamento do eixo do motor elétrico, Figuras 5 e 6.

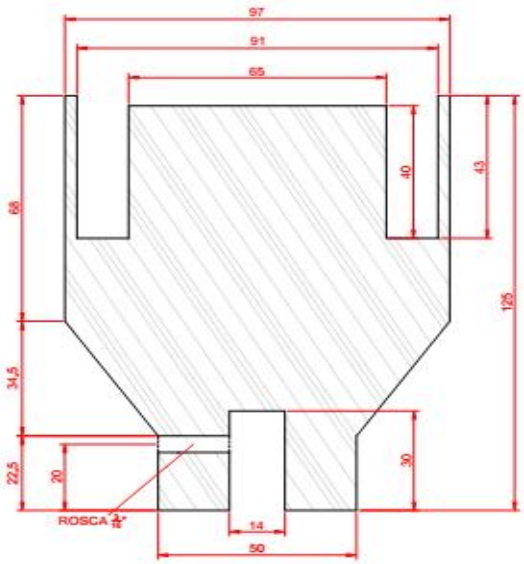

Figura 6 – Vista em corte do rotor de imãs permanentes.

- O rotor foi usinado em poliacetal devido as suas propriedades de trabalhabilidade e estabilidade dimensional tanto no processo de fabricação quanto em sua utilização, garantindo assim baixas deformações em temperaturas de até 100 °C, Figura 7.

Figura 7 – Rotor para imãs permanentes.

- Seis imãs permanentes de neodímio NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro) em formato de bloco com dimensões de 10x20x40 mm, Figura 8, que

foram utilizados para compor o rotor magnético que com o auxílio do motor elétrico, tornou-se variável a fim de gerar correntes de *Foucault* no cilindro de cobre.

Figura 8 – Bloco de imã de neodímio.

Na Tabela 1, conforme dados do fornecedor (Koimãs), têm-se as características dos imãs utilizados.

Tabela 1 - Característica dos imas de neodímio n-35

Grade	Br	BH max	Hc	T
	Ramanência	Produto da Energia Máxima	Força Coerciva	Temperatura Máxima de Trabalho
	G	MGOe	Oe	°C
N-35	11,400 / 11,800	33,0 / 36,0	>10,800	80

Fonte: Koimãs.

- Sendo:
  - Grade - A classificação do imã de acordo com sua composição e características construtivas, de modo geral a numeração, representa a força do campo magnético;
  - Remanência (Br) - O campo magnético produzido por um material magnetizado ou o campo retido após eliminação do campo externo aplicado, unidade Gauss (G);

- Produto da energia máxima (BH max) - A máxima energia que pode ser armazenada em um certo volume de material, ou seja, é a referência da energia de um imã, unidade Megagauss-Oersteds (MGOe);
- Força coerciva - O valor da intensidade de campo magnético desmagnetizante necessário para trazer a densidade de fluxo magnético a zero em um material previamente magnetizado, unidade Oersteds (Oe);
- Temperatura máxima de trabalho - A máxima temperatura na qual o imã mantém suas características magnéticas inalteradas, unidade graus Celsius (°C).

- Um motor elétrico trifásico da marca Voges, com potência de 1 cv, 2 polos, tensão de 220 V e rotação síncrona de 3415 rpm, para movimentação do rotor de imãs permanentes.

Figura 9 – Motor elétrico.

Fonte: Vogues.

- Duas resistências elétricas encapsuladas com potência total de 600 W, vide Figura 10.

- Estas foram fixadas em um suporte/tampa confeccionado em material poliacetal, utilizadas em substituição do trocador de calor indutivo, na avaliação do sistema de aquecimento para comparação.

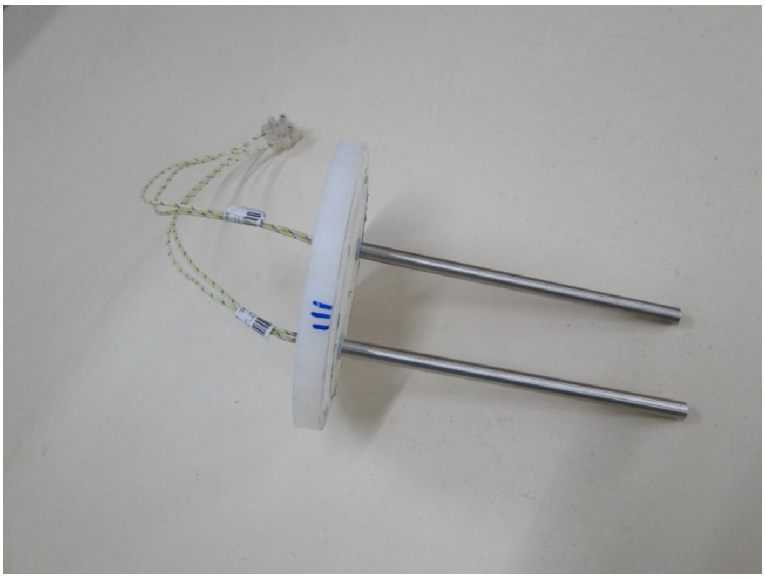

Figura 10 – Resistências Elétricas.

4.2 Materiais utilizados para a avaliação dos sistemas de aquecimento

Para a medição e a coleta de dados de temperatura foi utilizado um multímetro digital da marca Icel, modelo MD-6450; características, tensão DC/AC: 1.000 V/750 V, corrente AC/DC: 10 A, resistência: 40 MOhm, frequência: 10 MHz, capacitância: 100 uF, temperatura: 1.000 ºC.

Na aquisição dos dados de corrente e tensão no ensaio com sistema de aquecimento resistivo, foi utilizado um alicate amperímetro digital da marca Minipa, modelo ET4090, com as seguintes características, tensão DC/AC: 600 V/600 V; corrente ACA (GARRA): faixas de 40 A, 400 A, 1000 A; fator de potência: faixas de 0,10 ~ 0,99; potência: faixas de 1 kVA, 10 kVA, 100 kVA e 600 kVA.

Para a medição do consumo de energia do motor elétrico, utilizou-se um analisador de energia da Instrutherm, modelo AE200; especificações, Potência AC: 5 W ~ 9,999 MW (0 a 1000 A); Potência aparente AC: 0,000 VA ~ 9999 kVA, Potência reativa: 0,000 VAR ~ 9999 kVAR, Potência ativa: 0 mWh ~ 999999 kWh,

Corrente AC: 0,1 mA ~ 1000 A (3 faixas), Análise de sistemas monofásicos e trifásicos: 1P2 W, 1P3 W, 3P3 W, 3P4 W, Figura 11.

Figura 11 – Analisador de energia AE200.

O sensor de temperatura utilizado para medir a temperatura da água do reservatório foi um termopar tipo K para até 250 °C em uso contínuo, que acompanha o multímetro digital.

Um termômetro de mercúrio, com graduação de 0 °C a 100 °C, foi utilizado para monitorar as temperaturas ambiente e da água adicionada ao reservatório.

A aquisição e armazenamento de dados foram feitas através dos programas computacionais (softwares) fornecidos junto com os equipamentos, multímetro e o alicate amperímetro.

Com o analisador de energia foi possível descarregar os dados registrados em arquivos de texto editáveis diretamente no computador.

Para as medidas das massas de água foi utilizada uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS5500C, com capacidade para 5 kg e precisão de 0,01 g até 999 g e 0,1 de 1001 g até 5000 g.

4.3 Métodos

4.3.1 Avaliação do Sistema de Aquecimento

A avaliação do sistema de aquecimento foi conduzida de forma a verificar o efeito das correntes induzidas no cilindro de cobre para o aquecimento de água.

Para tal, foram realizadas diferentes configurações do rotor de imãs permanentes, modificando-se as quantidades de imãs e as disposições de seus polos.

As correntes de *Foucault* são proporcionais à variação do fluxo magnético. Variando a quantidade de imãs foi possível alterar a frequência de variação do fluxo magnético em relação ao cilindro de cobre sem alterar a rotação do motor elétrico e assim avaliar a resposta do sistema.

Para verificar a interação dipolar do material dissipador de calor (cobre) com o campo magnético, foi estipulada a condição de inversão e não inversão dos polos dos imãs permanentes.

De modo a classificar as variações do sistema de aquecimento analisado, consideraram-se os cenários um, dois e três, tratados da seguinte maneira:

- Cenário um - o rotor primeiramente recebeu seis imãs alojados com inversão de polaridade, ou seja, alternadamente tinha-se um imã com polo norte e outro com polo sul voltados para uma dada direção e, posteriormente, todos os imãs foram realocados com os mesmos polos voltados para a face externa do rotor;
- Cenário dois - o dispositivo de variação do fluxo magnético (rotor) recebeu quatro imãs, obedecendo à mesma análise do cenário um;
- Cenário três - aquecimento através do sistema convencional resistivo.

A massa de água utilizada para as avaliações foi de 15 kg em cada repetição, determinada através de balança digital com precisão de 0,1 g.

Para diminuir a temperatura residual do trocador de calor e evitar qualquer possibilidade de interferência na temperatura inicial da massa de água para as novas repetições, ao final de cada ensaio foram adicionados 5 kg de água em temperatura ambiente e após um período de tempo de cinco minutos essa água era retirada do reservatório.

. O intervalo de tempo total entre as repetições foi de trinta minutos. Esse tempo foi utilizado para reabastecer o reservatório, salvar os dados e preparar o ensaio para a nova coleta de dados.

A massa de água utilizada em cada análise era colocada inicialmente em um recipiente de modo a estabilizar a temperatura com a temperatura ambiente. Nos dias das avaliações a temperatura ambiente ficou em torno de 25 °C.

Para estabelecer um parâmetro comum de correlação entre as diferentes configurações no sistema indutivo por imãs permanentes (cenário um e dois), foi necessário calcular a frequência de variação do fluxo magnético em relação ao dissipador de calor (cilindro de cobre), para isso foi utilizada a Equação 02.

$$f = P.\frac{ns}{120} \qquad \text{(Eq. 02)}$$

Onde:

f = Frequência (Hz);

P = Número de polos;

ns = Rotação síncrona do motor (rpm).

A energia fornecida para a massa de água foi calculada através da quantidade de calor fornecido no período de tempo de cada repetição.

Primeiramente a energia foi quantificada em calorias com auxílio da Equação 03. Posteriormente, esta foi transformada em quilowatt/hora para fins de comparação com a energia elétrica consumida da rede. Depois disso foi calculada a eficiência dos sistemas de aquecimento para todos os cenários.

$$Q = m * c * \Delta T \quad \text{(Eq.03)}$$

Em que:

Q = Quantidade de calor (cal)

m = massa (g)

c = calor específico (cal/gºC)

ΔT = variação de temperatura (ºC)

4.3.2 Cenário 1

O motor elétrico responsável pela movimentação do rotor de imãs permanentes foi ligado à rede elétrica numa configuração tipo triângulo, dessa forma o motor tem maior capacidade de torque em função da rotação.

O motor elétrico nesta configuração produz uma rotação máxima de 3415 rpm, dentro das condições normais de carregamento (dado fornecido pelo fabricante na placa de especificação do motor).

Neste cenário 1, o rotor recebeu seis imãs e cada um possui dois polos. Dessa maneira, foi possível determinar a frequência relativa da variação do campo magnético em função da rotação do motor. Utilizando a Equação 02, o valor da frequência foi de 170,75 Hz, aproximadamente.

O conjunto (motor/rotor) foi montado sob um suporte metálico, e este recebeu o reservatório de água, conforme ilustradas nas Figuras 12.

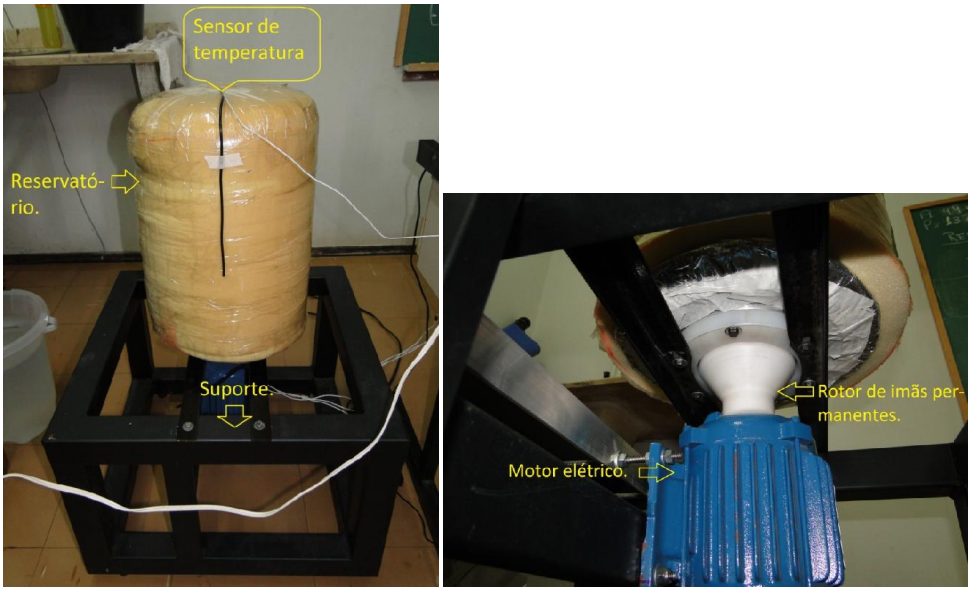

Figura 12 – Vista geral do protótipo.

A Figura 14 representa um desenho esquemático do rotor magnético, com seis imãs dispostos com inversão de polaridade. Nesta conformação, a interação entre os imãs é de atração, existindo assim um fluxo magnético de um imã para outro, conforme apresentado a seguir.

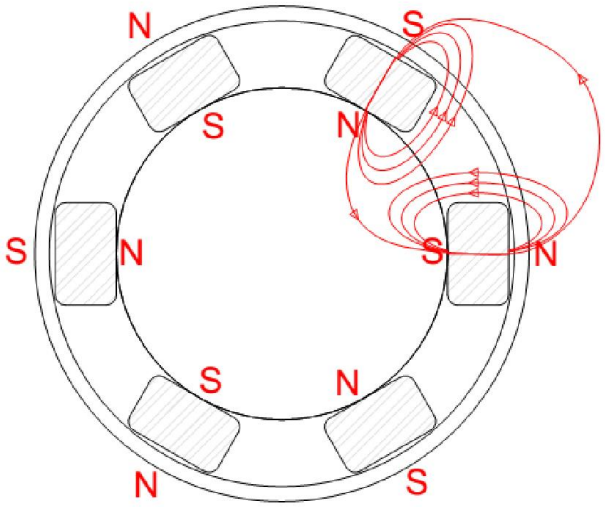

Figura 14 – Planta baixa do rotor magnético composto de seis imãs com inversão de polos.

Os campos magnéticos dos seis imãs dispostos com inversão de polos geraram uma força contra eletromotriz com elevada magnitude. Nessa configuração, constatou-se que o motor elétrico empregado no experimento não foi capaz de movimentar o rotor sem que houvesse sobrecarga de energia.

Assim, considerando que a sobrecarga poderia danificar o motor elétrico, optou-se por não realizar o ensaio com esta configuração, ou seja, a do rotor com os seis imãs permanentes com polos invertidos.

A segunda condição de análise do cenário 1 preconizou o rotor magnético com seis imãs permanentes sem inversão de polaridade, ou seja, todos os imãs com os mesmos polos direcionados para a face externa do rotor, conforme apresentado na Figura 15.

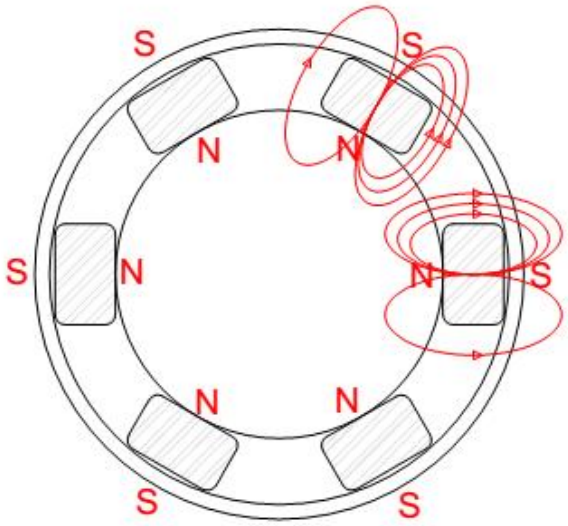

Figura 15 – Planta baixa do rotor magnético composto de seis imãs sem inversão de polos.

Alojados dessa maneira, a interação entre os imãs foi de repulsão mútua, não existindo fluxo magnético de um imã para outro, havendo então uma concentração do fluxo magnético em cada imã.

A Figura 16 mostra o rotor usinado em poliacetol com os imãs instalados para compor o cenário 1. Foi necessário colocar um material para separar os imãs e assim evitar o deslocamento radial quando o mesmo estivesse em movimento.

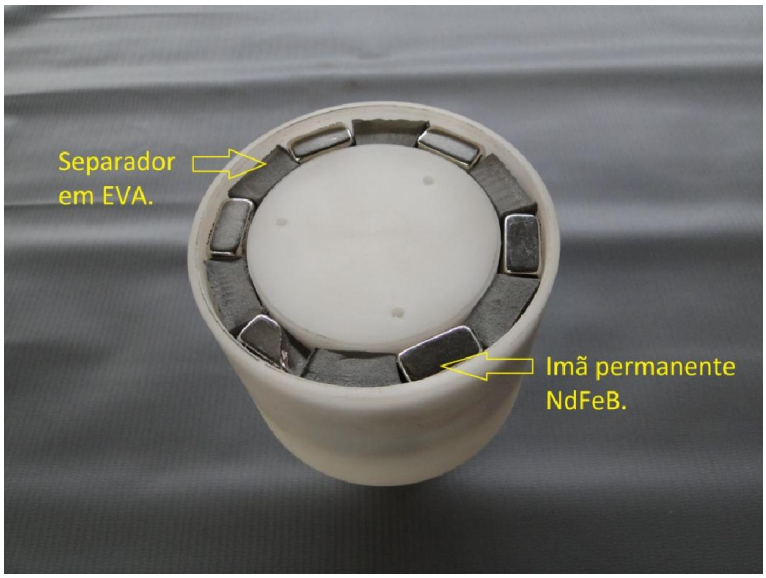

Figura 16 – Detalhe do rotor com seis imãs.

Então, com este arranjo do rotor com seis imãs permanentes foram feitas as três repetições.

O ensaio foi iniciado com a temperatura da massa de água em torno de 25 °C. A temperatura de término foi estipulada em função da temperatura máxima aproximada de 80 °C, temperatura amplamente empregada em processos agroindustriais.

As leituras das variações das temperaturas de início e fim foram feitas com o auxílio do multímetro com programa computacional.

O sensor de temperatura foi posicionado na porção média do reservatório e fixado em uma haste confeccionada com fio de cobre rígido, de modo a manter-se imóvel.

A energia térmica fornecida para a massa de água foi calculada com a Equação 03 em função da variação de temperatura registrada entre o início e fim do ensaio.

A energia consumida pelo motor elétrico foi calculada através dos dados de corrente, tensão e potência que foram contabilizados e armazenados pelo analisador de energia.

Os dados de temperatura e energia foram medidos a cada cinco minutos.

4.3.3 Cenário 2

No cenário 2 foram utilizados os mesmos materiais e equipamentos aplicados no cenário 1, diferindo apenas na quantidade de imãs empregados. Neste caso foram quatro.

Considerando quatro imãs, o emprego da Equação 02 para o cálculo da frequência relativa de variação do campo magnético, em relação ao cilindro de cobre, apresentou uma frequência de 113,83Hz.

Analogamente ao disposto com o rotor composto por seis imãs, existiu a interação de atração entre os imãs, conforme é mostrado na Figura 17.

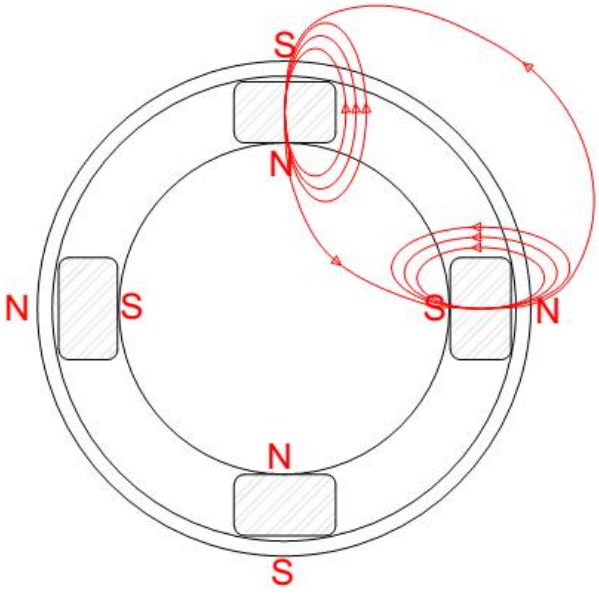

Figura 17 – Planta baixa do rotor magnético composto de quatro imãs com inversão de polos.

A Figura 18 mostra representativamente as linhas de campo magnético do rotor configurado com quatro imãs sem inversão de polos. Esta configuração foi utilizada na segunda condição do cenário 2.

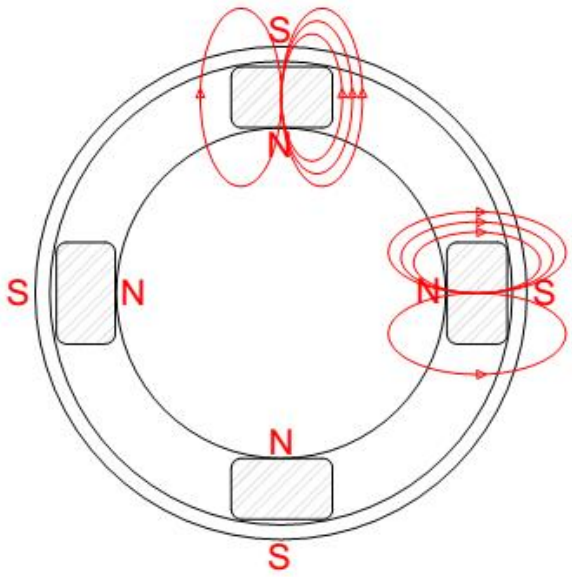

Figura 18 – Planta baixa do rotor magnético composto de quatro imãs sem inversão de polos.

O rotor de poliacetol, Figura 19, recebeu quatro imãs permanentes e os ensaios ocorrerem segundo as duas variações de condição de polarização anteriormente descritas.

Os ensaios seguiram os mesmos critérios estabelecidos no cenário 1 quanto à temperatura inicial da massa de água em torno de 25 °C e final de 80 °C e quanto ao o número de repetições e a frequência das coletas de dados.

A leitura da variação de temperatura inicial até a temperatura final foi realizada com multímetro/programa computacional e o sensor de temperatura na mesma posição do reservatório.

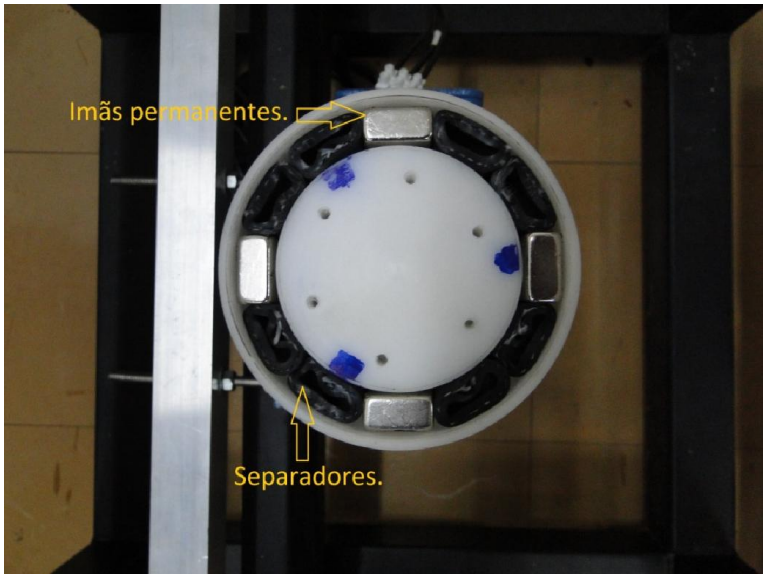

Figura 19 – Detalhe do rotor com quatro imãs.

4.3.4 Cenário 3

Para comparação do sistema de aquecimento indutivo com imãs permanentes foi colocado no reservatório um sistema de aquecimento resistivo, que é amplamente utilizado para esse fim.

As duas resistências elétricas encapsuladas de 300 W cada, que compuseram o sistema resistivo com potência total de 600 W.

O aquecedor foi instalado em substituição ao sistema indutivo por imãs permanentes no mesmo reservatório, garantindo-se as mesmas condições de isolamento e troca térmica, conforme é ilustrado na Figura 20.

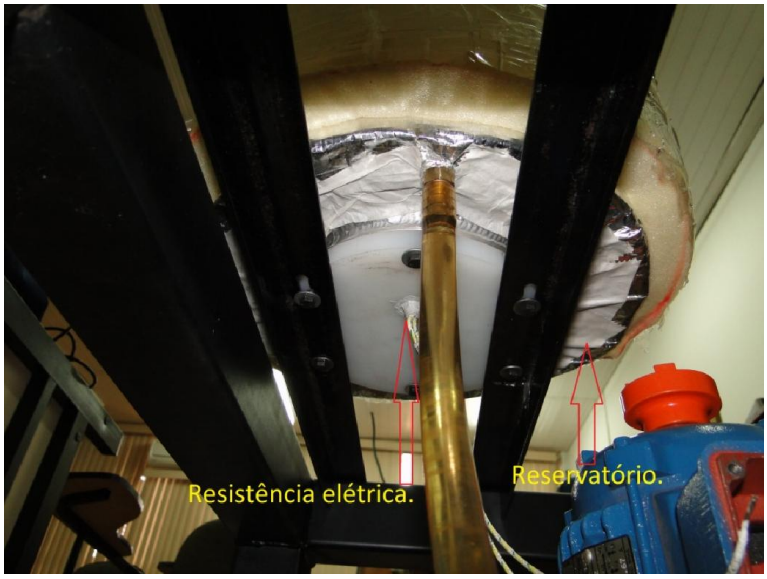

Figura 20 – Detalhe do sistema de aquecimento resistivo.

Com temperatura inicial e final próximos de 25 °C e 80 °C, respectivamente, o ensaio com aquecimento resistivo foi realizado também com três repetições.

A leitura e o registro dos dados de temperatura da massa de água ficaram a cargo do multímetro, enquanto os dados da energia elétrica consumida da rede foram feitos com o alicate amperímetro, ambos com frequência de cinco minutos.

A energia térmica fornecida para massa de água, foi calculada com a Equação 03 em função da variação de temperatura.

A aquisição dos dados foi feita através do (softwares) de cada aparelho mencionado.

4.4 Cálculos das eficiências

O rendimento ou eficiência é dado pelo quociente entre a energia útil para aquecer a massa de água e a energia empregada ou fornecida para o funcionamento dos sistemas, considerando ainda as perdas.

A energia útil para o aquecimento da massa de água foi calculada através da Equação 03, em função da variação da temperatura inicial e final expressa em calorias e posteriormente convertida em potência.

A energia utilizada para a movimentação do rotor de imãs permanentes através do motor elétrico (cenários 1 e 2), e a energia empregada no sistema resistivo foram registradas pelos equipamentos já descritos e expressas em formato de potência.

Optou-se por fazer as análises das eficiência em termos de energia. Foi necessário então, converter os dados extraídos para potência no tempo decorrido de cada repetição. Assim foi possível calcular a eficiência dos sistemas através da Equação 04.

Posteriormente, foram gerados índices de conversão de energia empregada em cada avaliação e comparados os resultados obtidos para verificar a viabilidade de utilização da indução por imãs permanentes para o aquecimento de água no modelo proposto, em comparação ao sistema resistivo avaliado.

$$n = \frac{Ps}{Pe} * 100 \qquad \text{(Eq.04)}$$

Onde:

n = Eficiência (%);

Ps = Potência da saída/dissipada (energia utilizada no aquecimento de água) (kWh);

Pe = Potência de entrada/consumida (energia elétrica consumida da rede) (kWh).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios foram expressos em tabelas e gráficos, utilizando as abreviações das seguintes terminologias:

- EECR - Energia elétrica consumida da rede;
- ETUAA - Energia térmica utilizada para o aquecimento de água;
- 6ISI - Sistema seis imãs sem inversão de polos;
- 4ICI - Sistema quatro imãs com inversão de polos;
- 4ISI - Sistema quatro imãs sem inversão de polos;
- RES - Sistema resistivo.

5.1 Resultados do cenário 1

Na Tabela 2 estão expressos os resultados das três repetições ensaiadas para o rotor com seis imãs permanentes sem inversão de polaridade.

Tabela 2 - Dados do sistema indutivo com seis imãs sem inversão de polos

	Repetição 1			Repetição 2			Repetição 3		
Tempo (h)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)
00:00:00	24	0,000	0,000	25	0,000	0,000	25	0,000	0,000
00:05:00	27	0,062	0,052	28	0,053	0,052	27	0,053	0,035
00:10:00	29	0,063	0,035	31	0,054	0,052	30	0,054	0,052
00:15:00	32	0,063	0,052	33	0,054	0,035	32	0,055	0,035
00:20:00	34	0,063	0,035	34	0,055	0,017	34	0,055	0,035
00:25:00	37	0,063	0,052	37	0,055	0,052	36	0,055	0,035
00:30:00	40	0,064	0,052	39	0,055	0,035	38	0,055	0,035
00:35:00	42	0,063	0,035	41	0,055	0,035	40	0,055	0,035
00:40:00	45	0,063	0,052	43	0,055	0,035	42	0,055	0,035
00:45:00	47	0,063	0,035	45	0,055	0,035	44	0,054	0,035
00:50:00	50	0,063	0,052	47	0,055	0,035	47	0,055	0,052
00:55:00	52	0,063	0,035	50	0,055	0,052	48	0,055	0,017
01:00:00	54	0,063	0,035	51	0,055	0,017	50	0,055	0,035
01:05:00	56	0,063	0,035	53	0,055	0,035	52	0,055	0,035
01:10:00	58	0,063	0,035	55	0,055	0,035	54	0,054	0,035
01:15:00	61	0,063	0,052	57	0,055	0,035	56	0,054	0,035
01:20:00	64	0,063	0,052	59	0,055	0,035	58	0,055	0,035
01:25:00	66	0,063	0,035	61	0,055	0,035	60	0,055	0,035
01:30:00	68	0,063	0,035	63	0,055	0,035	62	0,055	0,035
01:35:00	70	0,063	0,035	65	0,055	0,035	64	0,054	0,035

Tabela 2 - Continuação

01:40:00	73	0,063	0,052	67	0,055	0,035	66	0,054	0,035
01:45:00	74	0,062	0,017	68	0,055	0,017	68	0,054	0,035
01:50:00	76	0,061	0,035	71	0,055	0,052	70	0,054	0,035
01:55:00	79	0,059	0,052	72	0,055	0,017	72	0,055	0,035
02:00:00	80	0,057	0,017	74	0,055	0,035	74	0,054	0,035
02:05:00				76	0,055	0,035	76	0,055	0,035
02:10:00				78	0,055	0,035	78	0,055	0,035
02:15:00				80	0,055	0,035	79	0,054	0,017
Somatória		1,499	0,977		1,476	0,959		1,470	0,942
Rendimento		65,15			65,02			64,07	
Média Global		EECR 1,482			ETUAA 0,959			Rendimento 64,75	

Observa-se que na primeira repetição o tempo de ensaio foi menor. Essa resposta pode ser atribuída ao fato de que os imãs ainda não estavam aquecidos, pois eles sofrem perda de intensidade do campo magnético quando expostos à temperatura. Em imãs compostos de NdFeB essa temperatura (de Curie) fica abaixo de 300°C, (CULLITY e GAHAM 2009).

A redução da intensidade do campo magnético consequentemente diminui as correntes induzidas e a força contra eletromotriz, o que pode ser observado pela redução de energia consumida da rede elétrica ao final da primeira repetição, mantendo-se nas demais repetições de modo quase constante.

O possível aquecimento dos imãs na segunda condição deste cenário, resultou em variações dos rendimentos muito próximas entre as repetições, sendo menor que 1% quando comparada à média global de 64,75%.

A Figura 21 representa graficamente os resultados em torno da média da energia elétrica consumida da rede (EECR) e da energia térmica utilizada para o aquecimento de água (ETUAA).

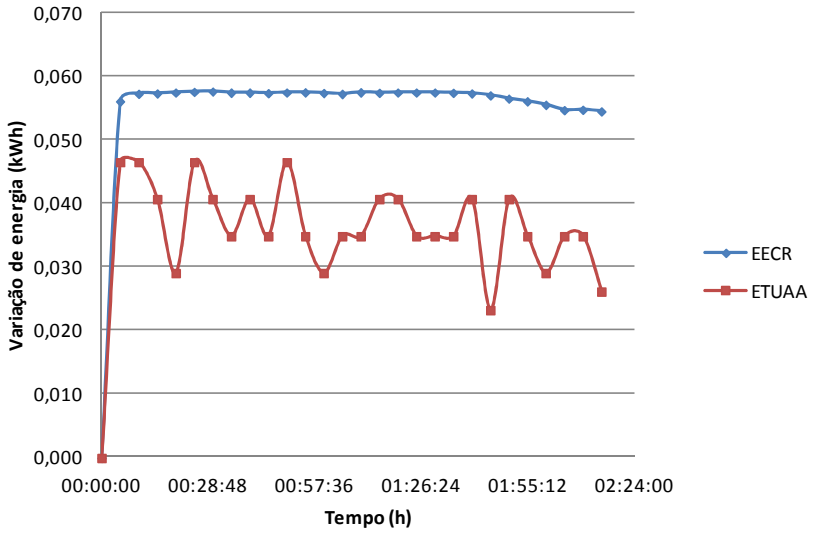

Figura 21 – Comparativo entre (EECR x ETUAA) para configuração de seis imãs sem inversão de polos.

Analisando a Figura 21, verifica-se que as oscilações da linha que representa a ETUAA, pode ser devido à resolução da temperatura e a frequência do tempo de medição da temperatura, aliados ao gradiente de convecção de calor da massa de água, existente dentro do reservatório.

Na série de dados apresentados para EECR, fica evidente a redução do consumo de energia elétrica ao final do ensaio, comprovando o que pode ser a redução da força contra eletromotriz.

5.2 Resultados do cenário 2

Os resultados da primeira condição do cenário 2, com o rotor composto de quatro imãs permanentes dispostos com inversão de polos, estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do sistema indutivo com quatro imãs com inversão de polos

	Repetição 1			Repetição 2			Repetição 3		
Tempo (h)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)
00:00:00	26	0,000	0,000	25	0,000	0,000	24	0,000	0,000
00:05:00	29	0,063	0,052	27	0,064	0,035	28	0,061	0,070
00:10:00	32	0,063	0,052	29	0,064	0,035	30	0,063	0,035
00:15:00	35	0,064	0,052	32	0,063	0,052	33	0,063	0,052
00:20:00	37	0,063	0,035	34	0,063	0,035	35	0,063	0,035

Tabela 3 - Continuação

00:25:00	39	0,063	0,035	37	0,063	0,052	38	0,063	0,052
00:30:00	42	0,063	0,052	39	0,063	0,035	41	0,063	0,052
00:35:00	44	0,063	0,035	42	0,063	0,052	42	0,063	0,017
00:40:00	46	0,063	0,035	44	0,063	0,035	44	0,063	0,035
00:45:00	49	0,063	0,052	46	0,063	0,035	47	0,063	0,052
00:50:00	51	0,064	0,035	48	0,063	0,035	50	0,063	0,052
00:55:00	53	0,064	0,035	51	0,063	0,052	52	0,063	0,035
01:00:00	56	0,063	0,052	53	0,063	0,035	54	0,063	0,035
01:05:00	58	0,063	0,035	55	0,063	0,035	56	0,063	0,035
01:10:00	60	0,063	0,035	58	0,063	0,052	59	0,063	0,052
01:15:00	63	0,063	0,052	61	0,063	0,052	61	0,063	0,035
01:20:00	65	0,063	0,035	62	0,063	0,017	64	0,063	0,052
01:25:00	68	0,063	0,052	65	0,063	0,052	66	0,063	0,035
01:30:00	70	0,063	0,035	67	0,063	0,035	67	0,063	0,017
01:35:00	72	0,063	0,035	70	0,063	0,052	70	0,063	0,052
01:40:00	74	0,063	0,035	72	0,063	0,035	72	0,063	0,035
01:45:00	76	0,064	0,035	74	0,063	0,035	74	0,063	0,035
01:50:00	79	0,064	0,052	76	0,063	0,035	76	0,063	0,035
01:55:00				79	0,063	0,052	79	0,063	0,052
02:00:00				81	0,064	0,035	80	0,064	0,017
Somatória		1,393	0,925		1,517	0,977		1,512	0,977
Rendimento		66,39			64,42			64,59	
Média Global		EECR 1,474			ATUAA 0,959			Rendimento 65,13	

Com esta configuração do rotor, a frequência relativa da variação do fluxo magnético foi reduzida de 170,75 Hz para 113,83 Hz, o que representa uma queda de 33,33%.

Tal fato sugere uma redução nas correntes induzidas, pois segundo a Castro et al (2002), as correntes de *Foucault* são diretamente proporcionais à variação do fluxo magnético.

Entretanto, o rendimento médio ficou em 65,13%, ligeiramente superior ao do sistema com 6 imãs sem inversão de polos, que foi de 64,75%. Esse fenômeno pode ser atribuído à interação dipolar do cobre em resposta à inversão de polos dos imãs.

Valores de rendimento próximos de 65% foram encontrados no estudo realizado por Celuppi et al (2014), que avaliou um sistema de aquecimento com

coletores solares, tendo como objetivo o pré-aquecimento de água para alimentação de caldeiras agroindustriais.

Analogamente, pode-se dizer que ao alternar os polos dos imãs, poderá ocorrer um aumento do "atrito" magnético, gerando com maior magnitude as correntes induzidas e um consequente aumento de energia térmica produzida.

Segundo Cullity e Gaham (2009), tal comportamento pode ser divido à mudança de polarização dos imãs, dessa forma o cobre sofre ciclos completos de histerese magnética, aumentando assim a energia envolvida no processo.

A Figura 22 expressa graficamente os resultados da média da energia elétrica consumida da rede (EECR) e da energia térmica utilizada para o aquecimento de água (ETUAA) com o rotor configurado com 4 imãs com inversão de polos.

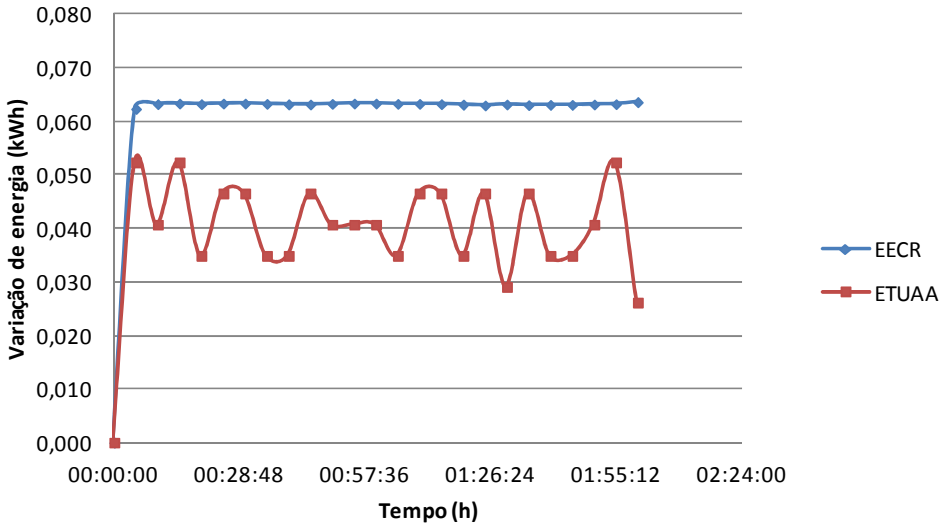

Figura 22 – Comparativo entre (EECR x ETUAA) para configuração de quatro imãs com inversão de polos.

Observa-se na figura 22 um comportamento mais constante da EECR, o que sugere o menor aquecimento dos imãs, pois com um menor aquecimento ocorre a manutenção do campo magnético e a geração de força contra eletromotriz. Tal fato confere ao motor elétrico um carregamento constante.

A possível redução de temperatura dos imãs também pode explicar o melhor rendimento dessa configuração do rotor quando comparado à segunda condição do cenário 1 (6ISI), levando-se em consideração a redução da frequência relativa.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos do ensaio que contempla a segunda condição do cenário 2, o rotor recebeu quatro imãs permanentes sem a inversão dos polos.

Tabela 4 - Dados do sistema indutivo com quatro imãs sem inversão de polos

	Repetição 1			Repetição 2			Repetição 3		
Tempo (h)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)
00:00:00	24	0,000	0,000	23	0,000	0,000	24	0,000	0,000
00:05:00	26	0,052	0,035	26	0,050	0,052	27	0,050	0,052
00:10:00	28	0,052	0,035	28	0,052	0,035	28	0,052	0,017
00:15:00	31	0,052	0,052	30	0,052	0,035	31	0,052	0,052
00:20:00	33	0,052	0,035	32	0,052	0,035	33	0,052	0,035
00:25:00	35	0,053	0,035	35	0,052	0,052	35	0,052	0,035
00:30:00	37	0,053	0,035	36	0,052	0,017	37	0,052	0,035
00:35:00	39	0,052	0,035	39	0,052	0,052	39	0,053	0,035
00:40:00	41	0,052	0,035	40	0,052	0,017	41	0,052	0,035
00:45:00	43	0,052	0,035	42	0,052	0,035	43	0,053	0,035
00:50:00	44	0,053	0,017	44	0,052	0,035	45	0,052	0,035
00:55:00	46	0,052	0,035	46	0,052	0,035	46	0,052	0,017
01:00:00	49	0,052	0,052	48	0,053	0,035	49	0,053	0,052
01:05:00	50	0,052	0,017	50	0,052	0,035	51	0,052	0,035
01:10:00	52	0,052	0,035	52	0,052	0,035	53	0,052	0,035
01:15:00	54	0,052	0,035	54	0,052	0,035	55	0,053	0,035
01:20:00	56	0,052	0,035	56	0,052	0,035	57	0,053	0,035
01:25:00	58	0,052	0,035	58	0,053	0,035	58	0,052	0,017
01:30:00	59	0,052	0,017	60	0,052	0,035	60	0,053	0,035
01:35:00	61	0,052	0,035	62	0,052	0,035	62	0,052	0,035
01:40:00	63	0,052	0,035	64	0,052	0,035	64	0,052	0,035
01:45:00	65	0,052	0,035	65	0,053	0,017	65	0,052	0,017
01:50:00	67	0,053	0,035	67	0,053	0,035	68	0,052	0,052
01:55:00	68	0,052	0,017	69	0,052	0,035	70	0,052	0,035
02:00:00	71	0,052	0,052	71	0,052	0,035	72	0,052	0,035
02:05:00	72	0,052	0,017	73	0,052	0,035	73	0,052	0,017
02:10:00	74	0,052	0,035	74	0,052	0,017	75	0,052	0,035
02:15:00	75	0,053	0,017	76	0,052	0,035	76	0,052	0,017
02:20:00	77	0,053	0,035	78	0,052	0,035	79	0,052	0,052
02:25:00	79	0,052	0,035	80	0,052	0,035	80	0,052	0,017
Somatória		1,517	0,959		1,516	0,994		1,513	0,977

Tabela 4 - Continuação

Rendimento	63,24	65,59	64,59
Média Global	EECR	ATUAA	Rendimento
	1,515	0,977	64,48

Observa-se que o consumo instantâneo da EECR foi menor, quando comparado com os ensaios anteriores

O consumo instantâneo de energia reduzido sugere que houve menor geração de força contra eletromotriz devido ao menor carregamento do motor elétrico e consequentemente menor produção de corrente induzida no volume de cobre.

As correntes induzidas são proporcionais à variação do campo magnético conforme Castro et al, (2002), o que foi comprovado quando reduziu-se o número de imãs. Com essa redução, houve queda do rendimento do sistema comparando as duas configurações do rotor onde não houve inversão de polaridade dos imãs.

A interação dipolar devido à inversão de polos tem efeito sobre a energia dissipada, pois analisando as duas condições de cenário 2 (4ICI x 4ISI) o melhor rendimento foi alcançado quando houve a inversão de polos.

A Figura 23 ilustra os resultados da energia elétrica consumida da rede (EECR) e da energia térmica utilizada para o aquecimento de água (ETUAA) considerando o rotor montado com 4 imãs sem polos invertidos.

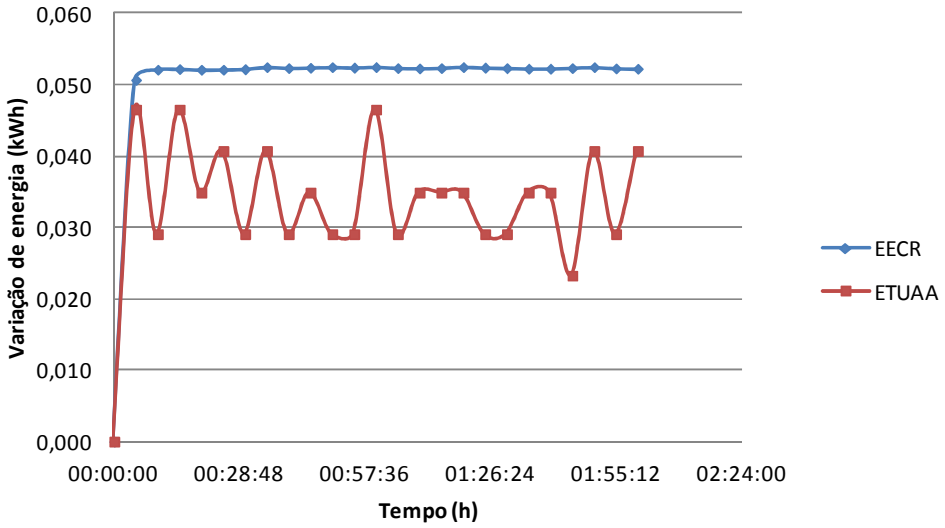

Figura 23 – Comparativo entre (EECR x ETUAA) para configuração de quatro imãs sem inversão de polos.

Verifica-se nos ensaios realizados no cenário 2, que o comportamento dos dados nos gráficos foram bastante semelhantes, apenas diferindo na magnitude dos valores e nos tempos mais elevados para os aquecimentos.

A energia elétrica instantânea consumida da rede e a energia térmica instantânea utilizada para o aquecimento de água foram em média 16,4% e 15,4% menores, respectivamente, quando comparadas ao rotor com polos invertidos desse cenário.

O menor consumo de energia instantânea justifica o maior tempo para o aquecimento da massa de água.

Os valores de rendimento apresentados nas avaliações dos sistemas indutivos com imãs permanentes foram em torno de 65%, valores de rendimento próximos foram encontrados em estudo realizado por Celuppi et al (2014) em avaliação de sistema de aquecimento com coletores solares, objetivando pré-aquecimento de água para alimentação de caldeiras agroindustriais.

5.3 Resultados do cenário 3

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos do ensaio que contempla o sistema resistivo.

Tabela 5 - Dados do sistema resistivo

	Repetição 1			Repetição 2			Repetição 3		
Tempo (h)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)	T (°C)	EECR (kWh)	ETUAA (kWh)
00:00:00	27	0,000	0,000	25	0,000	0,000	25	0,000	0,000
00:05:00	30	0,048	0,052	29	0,047	0,070	30	0,047	0,087
00:10:00	34	0,048	0,070	32	0,047	0,052	33	0,047	0,052
00:15:00	37	0,048	0,052	35	0,047	0,052	35	0,047	0,035
00:20:00	39	0,048	0,035	37	0,047	0,035	38	0,047	0,052
00:25:00	42	0,048	0,052	40	0,047	0,052	40	0,047	0,035
00:30:00	44	0,048	0,035	43	0,047	0,052	42	0,047	0,035
00:35:00	46	0,048	0,035	45	0,047	0,035	45	0,047	0,052
00:40:00	49	0,048	0,052	47	0,047	0,035	47	0,047	0,035
00:45:00	51	0,048	0,035	49	0,047	0,035	50	0,047	0,052
00:50:00	53	0,048	0,035	52	0,047	0,052	52	0,047	0,035
00:55:00	55	0,048	0,035	54	0,048	0,035	54	0,046	0,035
01:00:00	58	0,048	0,052	56	0,047	0,035	56	0,047	0,035
01:05:00	60	0,048	0,035	58	0,047	0,035	59	0,047	0,052
01:10:00	62	0,048	0,035	61	0,047	0,052	61	0,048	0,035
01:15:00	64	0,048	0,035	63	0,047	0,035	63	0,047	0,035
01:20:00	67	0,048	0,052	65	0,047	0,035	66	0,048	0,052
01:25:00	69	0,048	0,035	68	0,047	0,052	68	0,048	0,035
01:30:00	71	0,048	0,035	70	0,048	0,035	70	0,048	0,035
01:35:00	74	0,048	0,052	72	0,047	0,035	72	0,048	0,035
01:40:00	76	0,048	0,035	74	0,047	0,035	75	0,047	0,052
01:45:00	78	0,048	0,035	76	0,047	0,035	76	0,048	0,017
01:50:00	80	0,048	0,035	79	0,047	0,052	78	0,047	0,035
01:55:00				81	0,047	0,035	81	0,047	0,052
Média		1,057	0,925		1,085	0,977		1,084	0,977
Rendimento		87,46			90,03			90,15	
Média Global		EECR 1,075			ETUAA 0,959			Rendimento 89,21	

Observa-se na Tabela 5 que o rendimento do sistema resistivo, em termos energéticos, são superiores aos dois cenários que contemplam o aquecimento indutivo. Com o sistema resistivo o rendimento foi em média 89,21% contra aproximadamente 65% nos sistemas indutivos.

Verifica-se ainda que a energia elétrica consumida da rede (EERC) do sistema resistivo foi menor, quando comparada com os outros ensaios (cenários 1 e 2), bem como o tempo (1:55h) para alcançar a variação de temperatura pré-determinada (T=80 °C), o que comprova o maior rendimento.

A Figura 24 ilustra os resultados da energia elétrica consumida da rede (EECR) e da energia térmica utilizada para o aquecimento de água (ETUAA) considerando o aquecimento por resistência.

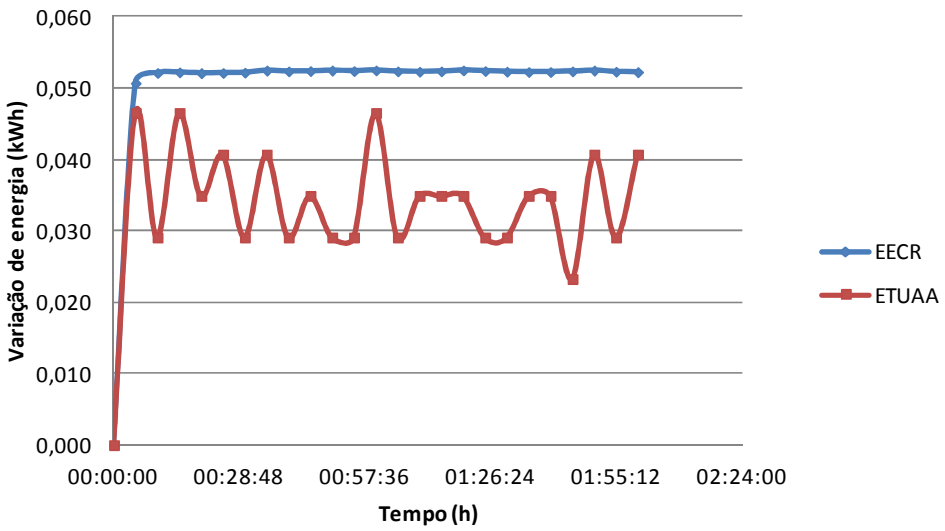

Figura 24 – Comparativo entre (EECR x ETUAA) para o sistema resistivo.

A trajetória das variações de energia sugere que existe uma grande disponibilidade de energia térmica utilizada para o aquecimento de água no início do ciclo e que tende a dissipar-se ao longo do tempo.

Tal comportamento pode ser explicado pela maior proximidade do sensor de temperatura da fonte de calor, fato ocorrido em função do comprimento das resistências elétricas utilizadas, uma vez que o sensor de temperatura foi mantido sempre na mesma cota em relação ao fundo do reservatório.

Para comparar os sistemas de aquecimento (cenários 1, 2 e 3), fez-se uma junção gráfica da energia elétrica consumida da rede (EECR), que estão expostos

na Figura 25. Já a Figura 26, apresenta as mesmas comparações dos três cenários, considerando a energia térmica utilizada para o aquecimento de água.

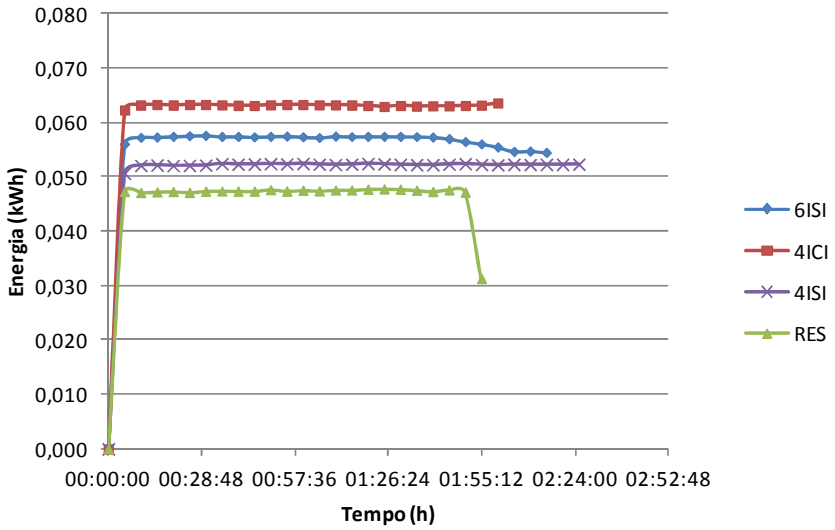

Figura 25 – Comparativo da energia elétrica consumida da rede (EECR) durante as condições propostas nos três cenários.

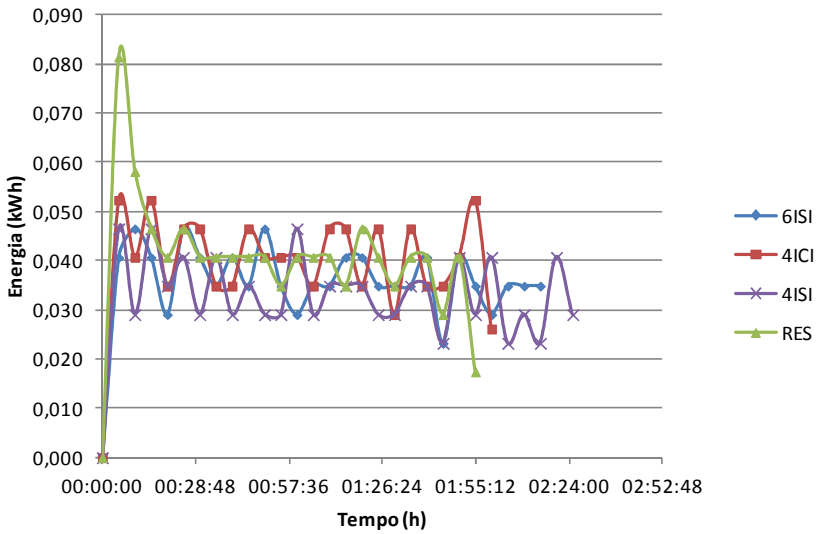

Figura 26 – Comparativo entre a energia térmica utilizada para o aquecimento de água (ETUAA) considerando os três cenários.

Nota-se na Figura 25 que o sistema composto por rotor de quatro imãs com inversão de polos obteve o maior consumo de energia para aquecer a massa de

água. Inversamente, observa-se que o sistema resistivo teve o menor consumo de energia em aproximadamente 27%.

Na Figura 26 compara-se a energia térmica utilizada no aquecimento da água. As oscilações apontam que existe uma certa dificuldade quanto ao registro dos dados. Tal fator, provavelmente é devido às condições de troca térmica na massa de água e resolução da temperatura.

Percebe-se no sistema resistivo, tendência nos dados mais constantes (menor oscilação) e que o sistema 4ICI aproxima-se desse comportamento.

A Figura 27 mostra um comparativo entre as variações de temperatura da água considerando os três cenários.

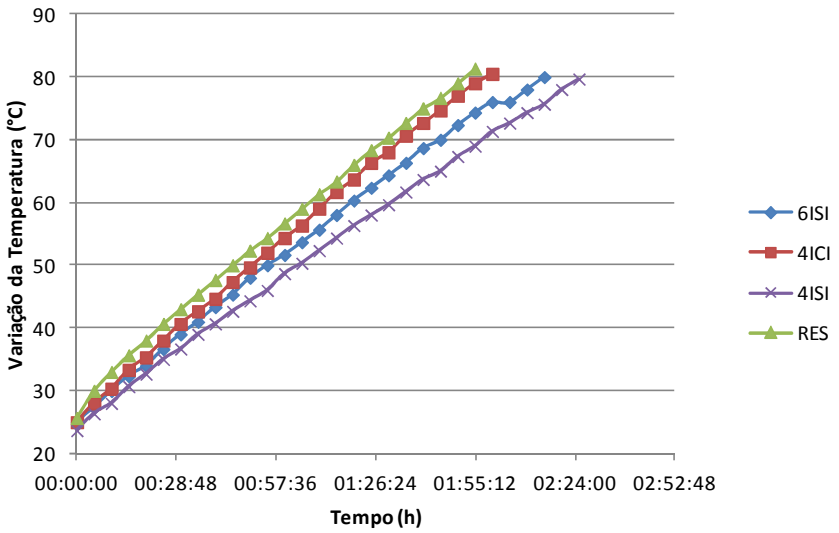

Figura 27 – Comparativo entre as variações de temperaturas da água considerando os três cenários.

Observa-se na figura 27 que o sistema resistivo teve um menor patamar de consumo de energia elétrica e ainda a melhor condição de troca térmica, quando comparado aos outros dois sistemas propostos (com imãs permanentes).

6. CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos entre as comparações dos três sistemas estudados, verifica-se que o método resistivo mostrou-se mais viável que o método indutivo com imãs permanentes.

Comparando as três configurações do sistema indutivo, pode-se observar que mesmo operando com frequência relativa em torno de 33% inferior, o sistema de quatro imãs com inversão de polos (4ICI) apresentou melhor eficiência que o sistema com seis imãs sem inversão (6ISI).

A energia elétrica consumida da rede no aquecimento resistivo foi menor que nas outras três propostas de aquecimento indutivo.

A eficiência média apresentada pelo sistema resistivo foi de 89,21%, enquanto que nos sistemas indutivos (4ICI) foi de 65,13%, (4ISI) 64,48% e (6ISI) 64,75%.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O sistema de aquecimento indutivo apresenta algumas características que se destaca em relação ao resistivo, pois evita em alguns casos o contato direto da corrente elétrica com o material a ser aquecido, o que pode ser interessante quando se trata de produtos inflamáveis ou explosivos, produtos que requerem maior nível de segurança quanto à esterilização como alimentos e produtos farmacêuticos e ainda tem maior vida util.

A possibilidade de utilização de um sistema de aquecimento nos moldes propostos pode ser interessante caso a energia mecânica utilizada para a variação do fluxo magnético seja proveniente de algum outro processo, neste caso seria definida como co-geração.

Considerando que apenas uma mudança na posição e quantidade de imãs apresentou resultado positivo, quando comparado os cenários 1 e 2, em futuros trabalhos pode-se avaliar o sistema com diferentes configurações e quantidade de imãs, ou ainda a utilização de uma ou mais bobinas para geração do campo magnético, dessa forma seria possível uma maior amplitude de frequências e forças empregadas na avaliação do sistema de aquecimento.

A utilização de um sistema indutivo puro poderia melhorar significativamente o rendimento do sistema de aquecimento, uma vez que este não é impactado por perdas de energia mecânica que ocorrem quando utiliza-se o motor elétrico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, F., **Estudo do Desempenho de um Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar e Gás**, Porto Alegre, 2006, Dissertação, Disponível em ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/aita.pdf, Acesso em 28/07/2014.

ARRUDA, L. B., **Operação de Sistemas de Aquecimento Solar de Água com Controle de Vazões em Coletores Planos**. São Paulo, 2004, Tese, 203p. Disponível em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../TeseLaerteBArrudaCorrigida.pdf, Acesso em 06/08/2014.

BALDASSIN JUNIOR, R., CORTEZ, L. A. B., JORDAN, R. A., NEVES FILHO, L. C., SILVEIRA JUNIOR, V., PACCO, H. C. . **Consumo de energia elétrica de um laticínio tipo A e estudo de racionalização do uso de energia elétrica nos processos de resfriamento de leite e aquecimento de água: um estudo de caso**. In: AGRENER 2004 - 5o Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, 2004, Campinas. Anais, 2004.

BAPTISTA, A. S. C., **Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Aquecedores Solares de Água em Resorts no Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro 2006, 158 p., Dissertação, Disponível em www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/asleman.pdf, Acesso em 10/05/2014.

CARNEIRO A. A. O., TOUSO A. T., BAFFA O., Avaliação da Susceptibilidade Magnética usando uma Balança Analítica, **Química Nova**, Vol. 26, Num. 6, 952-956, 2003.

CASTRO, N. A., RODRIGUES, D., LANDGRAF, F. J. G., **Pó de Ferro Microencapsulado: Efeito do Tratamento Térmico de Recozimento na Redução das Perdas Magnéticas**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2002, SÃO PAULO. Anais do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p. 891-903.

CELUPPI R., SCAPINELLO, J., ANDRADE, G. D. F., REVELLO H. P. J., DAL MAGRO J., Solar energy use for water pre-heating in boilers of agro-industries, **Engenharia Agricola**. vol.34 no.3 Jaboticabal May/June 2014.

CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D., **Introduction to Magnetic Materials**, 2ª edição, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.

CURTINAZ M. L., **Estudo de Confiabilidade e Assertividade na Inspeção Superficial pelo Método de Correntes Parasitas**, Porto Alegre, 2012, Dissertação, Disponível em http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2/browse?value=Curtinaz%2C+Marconi+Lanzarini&type=author, Acesso em 05/08/2014.

DIETRICH, A. B. ; CHABU, I. E. ; CARDOSO, J. R. . Eddy-current brake analysis using analytic and FEM calculations - Part I : Theory. In: IEMDC 2001, 2001, Cambridge, Massachussets. **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, 2001. p. 454-457.

EVARISTO, K, S., FIGUEIREDO, R, S., **Custo do Vapor em Agroindústria**, XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Rio Branco, Acre, 2008.

FILARDO J.V., **Perdas Magnéticas**, Universidade Federal do Paraná, Disponível em www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Juliano**Filardo**.pdf, Acesso em 10/08/2014.

FISH, M.M., GUIGAS, M., DALENBACK, J. O., A Review of Large-scale solar Heating Systems in Europe.**Solar Energy**, V. 63, n 6, p. 355-366, 1998.

FRIEDERMANN G. R., NUNES G. G., SOARES J. F., Magneto-V1: Um Programa para o Cálculo de Correntes Diamagnéticas e de Momentos Magnéticos Efetivos, **Química Nova**, Vol. 28, Num. 2, 340-344, 2005.

GANDHEWAR, Vivek R.; BANSOD, Satish V.; BORADE, Atul B. **Induction Furnace – A Review**.International Journal of Engineering and Technology, India. 2011.Disponível em: http://www.share-

pdf.com/63f877da234a4c7eb1d15c6c7af5d511/www.enggjournals.com_ijet_docs_IJET11-03-04-06.htm. Acesso em 05/08/2014.

JONES, P, L., TAYLOR, S., NAKAI, S., JENNINGS, J., Electroheat and Materials Processing, **Elsevier**, Capitulo 9, 38 pag, 2006.

JORDAN, R. A. ; CORTEZ ; BALDASSIN JR. ; NEVES FILHO ; LUCAS JR. ; PACCO, H. C. **Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, 2004.° Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída**, 2004, Campinas. Agrener GD 2004 - 5°. Bomba de Calor Água-Água Acionada a Biogás para Aquecimento e Resfriamento em Fazendas Leiteiras Visando a Racionalização no Uso da Energia Elétrica. In: Agrener GD 2004 - 5

LOURENÇO, B, J,. **Modelo de Ising Antiferromagnético em um Campo externo: Simulação por Amostragem Entrópica**, Belo Horizonte, 2011, tese, disponível em http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8MMK4P?show=full Acesso em 05/08/2014.

MATAJS, R. R.; FAGÁ, M. T. W. “Aquecimento de Água no Setor Residencial”. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA**, VII., 1996, Anais, Rio de Janeiro: COPPE; Clube de Engenharia, 1996. v. IV, p. 2125-2133.

MOREIRA, J. G. de S. **Energia Solar no Brasil: O uso de coletores planos para o aquecimento de água**. 1985. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

NAGARAJI J., GARUD, S.S., ASHOK K. K., RAMAKRISHNA R. M., 1 MW th industrial solar hot water system and its performance; **Solar Energy**; Vol. 39; Num. 5/6, pp 415-420. Elsevier Science Ltd.; Londres; 1999.

NASCIMENTO, M.D., BIAGGIONI, M. A. M., Avaliação Energética de uso de Lenha e Cavaco de Madeira para Produção de Energia em Agroindústria Seropédica. **Energia na Agricultura**, Vol 25, n3, 2010.

PANESI, A. R. Q., Aquecimento de Água por Energia Solar. **Sinergia** (CEFETSP), cefetsp, v. 02, p. 19-24, 2001.

POPA, C., PENTUIC, R., Analysis of a new induction thermal converter for heating. **Energy**, Vol. 42, p. 81-93, 2012.

RIBEIRO, G, A, P,. As Propriedades Magnéticas da Matéria: Um Primeiro Contato, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Vol. 22, Num. 3, 2000.

RODRIGUES, G, J, B,. O Porque de Estudarmos os Materiais Magnéticos, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Vol. 20, Num. 4, 1998.

ROMANOVSKY, G; MUTALE, J,. Implementation of heat production and storage technology and devices in power systems, **Applied Thermal Engineering**, Vol 48, 296-300, 2012.

SANTOS, P, C, L; SANTOS, F; SOUZA A. M. C,. Propriedades Magnéticas do Modelo de Hubbard com Saltos Eletrônicos de Longo Alcance,**Scientia Plena**, Vol. 1, Num. 5, 2005.

SILVA, J.B.C.; OLIVEIRA-NAPOLEÃO, I.T.; FALCÃO, L.L. **Desinfestação de substratos para produção de mudas, utilizando vapor de água**. Horticultura Brasileira, Brasília, v. 19, n. 2, p. 155-158 julho 2.001.

SOUZA R. D. **Balança de Curie e correntes de Foucault.** 2005, (Apostila), disponível em http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2005/RafaelD-Mansanares_RF1.pdf acessado em 21/07/2014.

VIEIRA L. R., **Estratégias para Minimizar o consumo de Energia Elétrica no Apoio a Sistemas Solares de Aquecimento de Água**, Porto Alegre, 2001, Dissertação, Disponível em www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2385/000318537.pdf, Acesso em 05/08/2014.

YOUNG, H. D; SEARS e ZEMANSKY. **Física III: Eletromagnetismo.** 10ª edição, São Paulo: Addison Wesley, 2004.

ZINN, S.; SEMIATIN, S. L. **Elements of Induction Heating**.ASM International.1988.