

**MAIÊUTICA
ENGENHARIAS**



UNIASSELVI

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
LEONARDO DA VINCI**

Rodovia BR 470, Km 71, nº 1.040, Bairro Benedito
89130-000 - INDAIAL/SC
www.uniasselvi.com.br

REVISTA MAIÊUTICA

Engenharia

UNIASSELVI 2018

Presidente do Grupo UNIASSELVI

Prof. Pedro Jorge Guterres Quintans Graça

Reitor da UNIASSELVI

Prof. Hermínio Kloch

Pró-Reitor de Ensino de Graduação Presencial

Prof. Antonio Roberto Rodrigues Abatepaulo

Pró-Reitora de Ensino de Graduação a Distância

Prof.^a Francieli Stano Torres

Pró-Reitor Operacional de Graduação a Distância

Prof. Érico Coelho Ribeiro

Pró-Reitor de Pós-Graduação

Prof. Carlos Fabiano Fistarol

Editor da Revista Maiêutica

Prof. Luis Augusto Ebert

Comissão Científica

Kátia Spinelli

Débora Mabel

Maria Helena Lenzi

Wanderlei Machado dos Santos

Editoração e Diagramação

Davi Phelippe Bloedorn

Capa

Cleo Schirmann

Revisão Final

Bruna da Silva

José Roberto Rodrigues

Publicação *On-line*

Propriedade do Centro Universitário Leonardo da Vinci

Apresentação

Caro leitor, dentro de uma nova proposta, a Revista Maiêutica: Engenharias nos apresenta com alguns dos melhores artigos dos professores e acadêmicos de todos os cursos de engenharias da UNIASSELVI, dentro de uma abordagem interdisciplinar no que tange a todas as áreas correlatas a esses cursos. Aliás, a implementação prática dos conceitos vistos em sala de aula é uma das premissas para a fortificação e internalização do conhecimento trabalhado ao longo das disciplinas e do desenvolvimento de bons trabalhos acadêmicos, que geram inclusive potencial para a implementação empreendedora, criativa e profissional. Este é o perfil dos artigos contemplados nesta edição e que conduzem os alunos à construção de sua própria história, com trabalhos que contribuem para a melhoria de vida dos nossos alunos e dos demais públicos envolvidos direta ou indiretamente com as soluções propostas. A valorização do conhecimento através desta publicação contribui para a disseminação do know-how gerado no decorrer dos estudos e potencializa a exploração de áreas ainda não exploradas, a inspiração e o aprofundamento de novas avenidas de pesquisa. O aprofundamento dos estudos torna simples a realização das tarefas para aqueles que detêm e desenvolvem e testam as possibilidades. Após diversos erros e acertos inerentes ao processo de aprendizado e de testagem, podem propor a solução que melhor atenda às especificidades e requisitos aos quais seu objetivo está alicerçado. Temáticas relevantes e atuais são abordadas ao longo da revista, como técnicas de construção sustentável e eficiência energética em placas fotovoltaicas, além de novos métodos que auxiliam a construção civil e manipuladores eletropneumáticos.

Que a leitura seja esclarecedora e inspiradora! Bom proveito!

Prof. Luis Augusto Ebert – Coordenador Engenharia Ambiental
Prof. Ricardo Floriani – Coordenador Engenharia de Produção



SUMÁRIO

1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE MOTORES DE ÍMÃS PERMANENTES – Mathematical modeling of permanent magnet motors	
Luiz Carlos Lemke ¹	
Julia Grasiela Busarello Wolff ²	7
2 CONCENTRADOR PRATO STIRLING: geração de energia limpa e eficiente – Dish stirling concentrator: clean and efficient energy generation	
Fredimar Otto	
Leilson Lima Maciel de Castro	
Marco Antônio Roncada	
Rodrigo Hoepers	
Julia Grasiela Busarello Wolff	49
3 AVALIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PARA MÓDULOS DE LED – Rating the printed circuit board for LED modules	
Jean Carlos Strutz	71
4 PROJETO, FABRICAÇÃO E OPERAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO – Design, manufacture and operation of an erosion test machine by cavitation	
Charles Zanini Miranda	81
5 ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA MIGRAÇÃO DE EMPRESAS PARA O MERCADO LIVRE DE ENERGIA – Viability analysis for migration of companies for the free energy market	
Felipe Amler	
Julia Grasiela Busarello Wolff	95
6 DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL OBJETIVANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – Development of residential automation application for energy efficiency	
Jackson Diego Campestrini	
Julia Grasiela Busarello Wolff	121
7 ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA EM RIO DOS CEDROS, SANTA CATARINA – Feasibility study for implementation of a hydroelectric generator center in Rio dos Cedros, Santa Catarina	
Paulo Sergio Sevegnani	
Julia Grasiela Busarello Wolff	153

MODELAGEM MATEMÁTICA DE MOTORES DE ÍMÃS PERMANENTES

Mathematical modeling of permanent magnet motors

Luiz Carlos Lemke¹
Julia Grasiela Busarello Wolff²

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo desenvolver a modelagem matemática de um motor de ímãs permanentes de onda trapezoidal, comumente conhecido como motor brushless DC, bem como apresentar um sistema de acionamento capaz de atender às solicitações da máquina. Ainda, há a tendência de aumentar a eficiência energética na indústria, reduzindo os custos relacionados à produção de bens e serviços e sabendo que é mais viável investir em otimização de sistemas de acionamento do que expandir a rede de transmissão e geração de energia. Assim, foi realizada uma pesquisa, na qual identificamos os princípios de funcionamento do motor e os principais elementos que compõem o inversor necessário ao acionamento e operação do motor. São apresentadas neste trabalho duas técnicas de controle, sendo elas o controle por modulação de pulso e o controle vetorial. Ainda, constam as principais características da arquitetura dos módulos de potência e controle do inversor, assim como os componentes de interface e do circuito de leitura do posicionamento do rotor. Tendo em vista o cunho teórico deste trabalho, foram apresentados resultados por meio de pesquisa e as possíveis aplicações de motores brushless DC, nas quais podemos obter ganhos significativos por meio da aplicação da tecnologia, reduzindo custos relacionados ao consumo de energia e aos insumos necessários para a produção industrial.

Palavras-chave: Motores síncronos. Acionamento elétrico. Modelagem matemática. Ímãs permanentes. Motores *brushless*.

Abstract: The objective of the present work is to develop the mathematical modeling of a permanent magnet motor of trapezoidal wave, commonly known as brushless DC motor, as well as to present a drive system capable of attending the requests of the machine. Aiming at increasing energy efficiency in the industry, reducing the costs related to the production of goods and services, knowing that it is more feasible to invest in optimization of drive systems, than to expand the transmission network and generation of energy, energy. For this was carried out a research where the principles of motor operation were identified and the main elements that compose the inverter necessary to the drive and operation of the motor were identified. In this paper, two control techniques are presented. These are the control by pulse modulation and vector control, in line with the objectives of the work. The main characteristics of the inverter power and control modules architecture are presented, as well as the interface components, of the rotor position reading circuit. Considering the theoretical nature of this work, results were presented by means of a research, which identified the possible applications of brushless DC motors, in which significant gains can be obtained through the application of this technology, reducing costs related to energy consumption and the inputs needed for industrial production.

Keywords: Synchronous motors. Electric drive. Mathematical modeling. Permanent magnets. Brushless motors.

Introdução

Atualmente, com a crescente necessidade do aumento da eficiência energética, buscamos cada vez mais inovar e aumentar a eficiência de motores elétricos, sendo que, em países desenvolvidos, cerca de 65% da energia elétrica produzida é consumida por motores elétricos.

Para se ter uma noção da quantidade de motores instalados em todo o mundo, podemos usar como base a quantidade de motores produzidos, que são mais de 5 bilhões de unidades por ano,

¹ Engenheiro eletricista na ELETROTÉCNICA FC. Rua Oscar Piske, n. 391 – Nações – Timbó, Santa Catarina. Contato: luizclemk@gmail.com.

² Professora do Curso de Engenharia Elétrica na UNIASSELVI. Rua Blumenau, n. 4664 – Araçonguinhas – Timbó, Santa Catarina. Contato: julia.wolff@uniasselvi.com.br.

compreendendo desde micromotores até máquinas de grande porte.

Segundo Silva e Neves (2015), o Brasil é o retentor do maior custo de energia para a indústria. Investimentos em eficiência energética nos sistemas de produção possibilitariam que a nossa indústria se tornasse mais competitiva, com redução nos custos de produção e de insumos.

Uma alternativa para aumentar a eficiência energética no setor industrial é a otimização de motores. Segundo estudo realizado pela WEG, diagnósticos realizados na indústria, com base em mais de 50 mil casos, apontam que, em média, 71% dos motores de uma indústria podem ser otimizados, com uma economia média de 9% (WEG, 2015). Em 22% deles é possível aplicar a variação de velocidade, elevando a economia média para 30%.

Há a substituição de motores trifásicos acionados diretamente pela rede por inversores de frequência, que operam em um sistema de malha fechada. O conjunto deve estar ligado diretamente ao processo e variando a velocidade automaticamente, aumentando a economia do conjunto. O motor entrega somente a potência necessária ao trabalho, sem desperdícios.

Nesse contexto, surgem os motores síncronos de ímãs permanentes (MSIP, ou *Permanent Magnetic Brushless Motors* – PMBM), os quais apresentam diversas aplicações em potências até 100 kW, apresentando inúmeras vantagens em comparação aos motores trifásicos de indução (MI) e aos motores síncronos de relutância (MRS). Suas características são elevada densidade de potência (razão entre potência e volume), facilidade de controle por meio de ajuste de corrente, redução do torque pulsante, ou seja, mantém um torque constante em toda a faixa de rotação.

Ainda, há alta eficiência em consequência da redução de corrente por fase do estator para uma mesma potência disponível e sem o acréscimo de tensão por fase, menor custo de manutenção e redução no ruído em comparação aos motores de corrente contínua.

Como discutido anteriormente, esses sistemas podem ser aplicados em diversos equipamentos, como torres de resfriamento, que são dimensionadas a partir dos valores de volume e temperatura da água a ser resfriada, sendo uma prática comum projetar o sistema a partir da maior temperatura do bulbo úmido do local de instalação.

Não devemos considerar as variações no processo, mudanças no volume de água de acordo com a produção, as mudanças climáticas ao longo do ano e a diferença de temperatura entre o dia e a noite.

Tendo em vista esses aspectos, o presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver a modelagem matemática de um motor síncrono de ímãs permanentes de onda trapezoidal, trifásico com rotor de polos não salientes, bem como apresentar um sistema de acionamento que consiga garantir o desempenho do motor.

Nos próximos tópicos, estão descritos aspectos sobre a classificação e principais características dos motores síncronos de ímãs permanentes mais utilizados na indústria e os princípios de funcionamento dessas máquinas. Ainda, é demonstrado o modelo matemático proposto neste trabalho e o sistema de acionamento, seus principais componentes e seu funcionamento.

Motor síncrono de ímãs permanentes

Por meio de avanços em pesquisas, da utilização de novos materiais e da melhoria na manufatura, houve uma grande melhoria no desempenho de máquinas de ímãs permanentes.

A descoberta da disponibilidade de altas densidades de energia em ímãs de terras raras de Samário-Cobalto (SmCO), em 1970, e de Neodímio-Ferro-Borro (NdFeB), em 1983, este último atualmente com densidade de energia acima de 400 KJ/m³, propiciou uma melhor re-

lação entre potência/massa de máquina, aumento de sua eficiência e confiabilidade em seu desempenho dinâmico, uma vez que a desmagnetização dos materiais acontece devido a elevadas temperaturas e à exposição em campos magnéticos bem mais intensos, comparados em relação aos ímãs de ferrite.

Segundo Hendersot e Miller (1994), a linha evolutiva dos motores de ímãs permanentes está diretamente ligada à evolução dos ímãs permanentes, por serem dependentes dessa fonte de excitação de campo.

Os motores síncronos de ímãs permanentes podem ser considerados uma evolução dos motores de corrente contínua convencionais, devido às semelhanças em seu funcionamento, ou seja, devido à excitação de campo em forma de corrente contínua por meio da utilização de ímãs permanentes.

Com a evolução dos semicondutores, tornou-se possível a substituição dos comutadores mecânicos por comutadores eletrônicos, reduzindo as perdas por centelhamento, ruído magnético e aquecimento, bem como a redução dos custos com manutenção. Gradualmente, os motores síncronos de ímãs permanentes tomam o espaço dos motores de corrente contínua.

As máquinas trifásicas são mais usuais devido ao seu torque com baixa oscilação, melhor utilização de seus condutores e menor número de comutadores em seu acionamento, com seus enrolamentos podendo ser ligados internamente em delta ou triângulo e sendo operados com apenas três condutores. Ainda, permitem uma grande variedade de configurações em seus ímãs e enrolamentos, sendo eles distribuídos de forma senoidal ou não senoidal.

As mesmas técnicas utilizadas para o resfriamento de motores CA e CC podem ser empregadas em motores *brushless* trifásicos. Segundo Hendersot e Miller (1994), a maioria dos motores *brushless* possui três fases, mas não é a única configuração possível.

Um dos primeiros motores lançados no mercado foi um motor de quatro polos lançado pela Siemens, em 1960. Seu controlador possuía oito transistores, dois por fase. Atualmente, ainda existem motores de duas fases, que são utilizados em pequenos ventiladores para resfriamento de circuitos eletrônicos.

Os motores síncronos possuem um enrolamento no estator, ou armadura, semelhante aos motores trifásicos de indução. A circulação de corrente nos enrolamentos distribuídos pelo estator produz um fluxo magnético que progride em torno do entreferro. Essas máquinas podem ser classificadas de acordo com a força contraeletromotriz produzida, incidindo no enrolamento do estator, que pode ser trapezoidal ou senoidal.

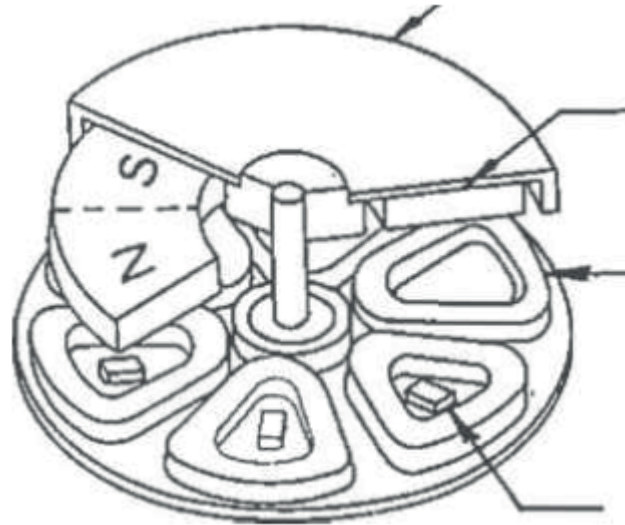
Motor de entreferro axial

Segundo Hendershot e Miller (1994), os motores síncronos de ímãs permanentes ainda podem ser classificados de acordo com a orientação de fluxo, sendo fluxo radial, fluxo axial e fluxo transversal.

São motores de baixo custo, possuem um grande entreferro axial entre o estator e o rotor devido a uma grande dispersão do fluxo magnético, têm baixa eficiência, uma forma plana e não possuem torque de relutância e borda pelo fato de não possuírem ranhuras. São fabricados com potências fracionárias, de alguns poucos watts.

Conforme Hendershot e Miller (1994), o motor utilizado em aplicações com pouca variação de velocidade e torque sem oscilações apresenta potência de saída baixa e a velocidade é geralmente menor do que 1000 rotações por minuto. As principais aplicações são em leitores de CDs, DVDs, discos rígidos e pequenos ventiladores utilizados em aparelhos eletrônicos.

Figura 1. Motor de fluxo axial



Fonte: Hendershot e Miller (1994).

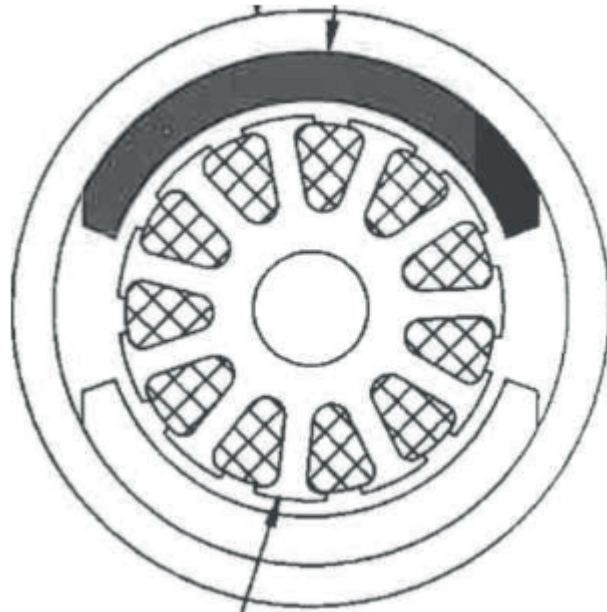
Motores com fluxo radial

Os motores de fluxo radial são os mais comuns, constituídos de um rotor interno ou externo com fluxo radial. O fluxo gerado pelos ímãs do rotor atravessa o entreferro, enlaça as bobinas do estator e retorna ao rotor através do entreferro. O fluxo é chamado de fluxo enlaçado. Geralmente, no rotor deste tipo de máquina, não existe enrolamento e o fluxo é praticamente constante, gerando baixas perdas, o que facilita a refrigeração.

Conforme Hendershot e Miller (1994), um motor com rotor interior possui a configuração do estator semelhante à configuração de um motor de indução. As principais vantagens da configuração são a baixa inércia e elevado torque. As desvantagens envolvem os cuidados necessários para a fixação dos ímãs na parte externa do rotor, evitando que eles se desloquem ou se desprendam da posição original com o movimento do rotor.

Os motores com rotor externo são projetados para aplicações necessárias em rotações e velocidades constantes. Esse motor tem a configuração de baixo custo e a montagem dos ímãs não é crítica, sendo que as forças, em funcionamento, atuam nos ímãs e não favorecem o seu deslocamento. O enrolamento de armadura do motor *brushless* com rotor externo é bastante similar ao de um motor CC convencional.

Figura 2. Motor de fluxo radial com rotor externo



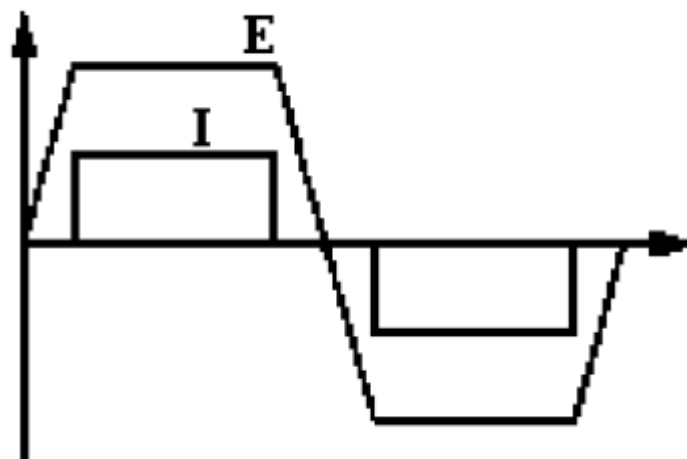
Fonte: Hendershot e Miller (1994).

Motores de onda trapezoidal

Os motores síncronos de ímãs permanentes de onda trapezoidal, também conhecidos como *brushless DC*, são projetados para poderem desenvolver uma onda de força contraeletromotriz (fem) trapezoidal e uma forma de onda da corrente idealmente retangular, tendo um nível fixo de corrente para desenvolvimento de um torque suave.

O uso dessa parte estendida na curva da fem de característica de torque senoidal causa uma grande flutuação do torque, mais pulsante. Podemos minimizar o efeito manipulando o projeto do motor para “aplainar” a característica, fazendo-o trapezoidal. Assim, normalmente, os ímãs permanentes são montados na superfície do rotor.

Figura 3. Forma de onda da tensão e corrente *brushless DC*



Fonte: WEG (2015).

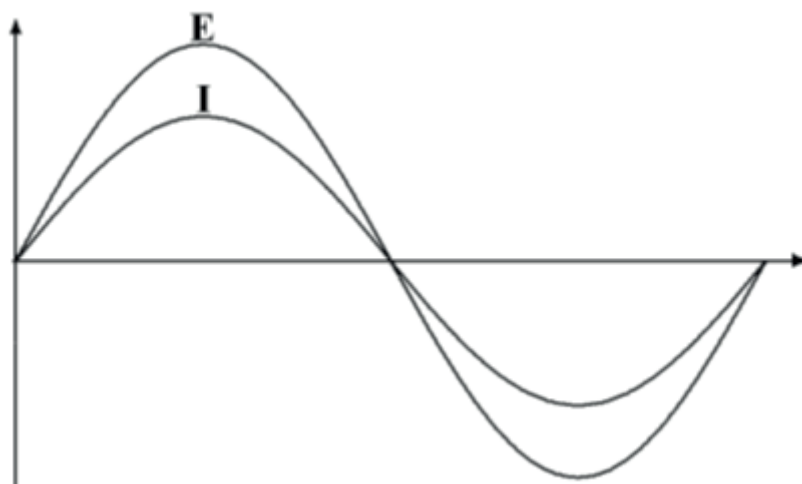
O controle do acionamento trapezoidal é mais simples, pois não há necessidade de um sensor de posição de alta resolução no rotor, uma vez que somente seis instantes de comutação da corrente das três fases devem ser monitorados a cada ciclo. Segundo Weg (2015), geralmente os motores são utilizados em aplicações de baixas potências, na faixa de alguns poucos kW. Em outras aplicações com altas potências, este tipo de motor apresenta desvantagens em relação ao *brushless AC*.

Motores de onda senoidal

O motor síncrono de ímãs permanentes de onda senoidal é projetado para desenvolver uma fcm e uma corrente de alimentação com forma de onda senoidal, resultando em um torque suave.

Conforme Weg (2015), a fcm senoidal requer uma distribuição dos enrolamentos do estator aproximadamente senoidal no entreferro ou uma forma de onda de indução magnética radial (B_r), gerada pelos ímãs com variação senoidal no entreferro.

Figura 4. Forma de onda da tensão e corrente *brushless AC*

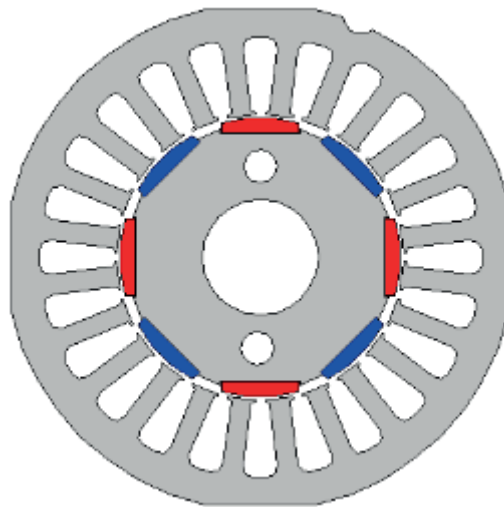


Fonte: WEG (2015).

O acionamento do *brushless AC* é mais complexo e requer sensores de corrente em cada uma das fases do motor e um sistema de posicionamento do rotor preciso e com alta resolução, o qual é necessário para manter o sincronismo da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor variando no tempo. Podem ser usados encoder óptico, resolver ou, ainda, sensores de efeito hall.

O motor pode ser projetado com ímãs na superfície ou ímãs internos no rotor. Quando os ímãs são dispostos na superfície do rotor, estes são conhecidos como motor de polos lisos. A indutância do eixo direto (L_d) e a indutância de quadratura (L_q) têm o mesmo valor e são constantes no motor (WEG, 2015).

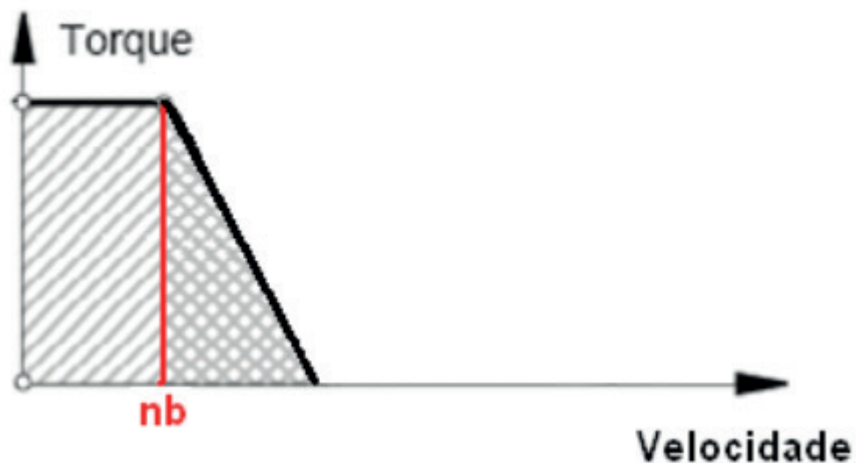
Figura 5. Motor *brushless AC* de polos lisos



Fonte: WEG (2015).

A utilização de ímãs dispostos na superfície do rotor traz desvantagens ao operarem em velocidades acima da nominal. O torque não é mais constante e decresce com o aumento da rotação, causado pela baixa indutância devido ao grande entreferro. Em razão da força centrífuga, os ímãs dispostos na superfície do rotor podem se desprender. A figura a seguir mostra o torque desenvolvido em função da velocidade. Podemos observar o declínio do torque quando o motor opera acima da rotação nominal (nb).

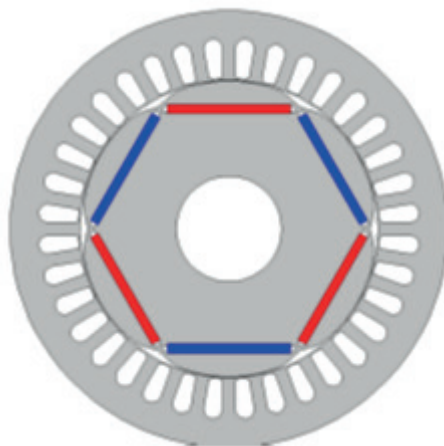
Figura 6. Torque desenvolvido em motores de polos lisos



Fonte: WEG (2015).

Os motores *brushless AC* com ímãs internos são capazes de operar com torque constante e em uma ampla faixa de rotação acima da nominal.

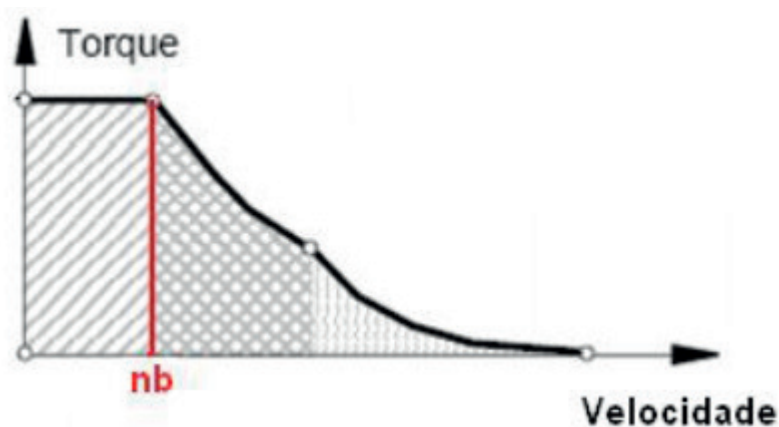
Figura 7. Motor de polos salientes



Fonte: WEG (2015).

Em consequência da geometria do rotor, tende a produzir indutâncias L_d e L_q diferentes e com saliências. Ainda, é produzido um torque de relutância no motor que se soma ao torque eletromagnético produzido pelos ímãs. Outra vantagem da fabricação de rotores com ímãs internos está aliada ao fato de que estes estão protegidos contra choques mecânicos e não são afetados pela força centrífuga.

Figura 8. Torque produzido em motores de polos salientes



Fonte: WEG (2015).

Princípio de funcionamento

Um motor síncrono de ímãs permanentes pode ser analisado a partir de cálculos muito semelhantes aos usados em motores síncronos convencionais, considerando que o motor síncrono com ímãs é excitado por uma corrente de campo de valor constante.

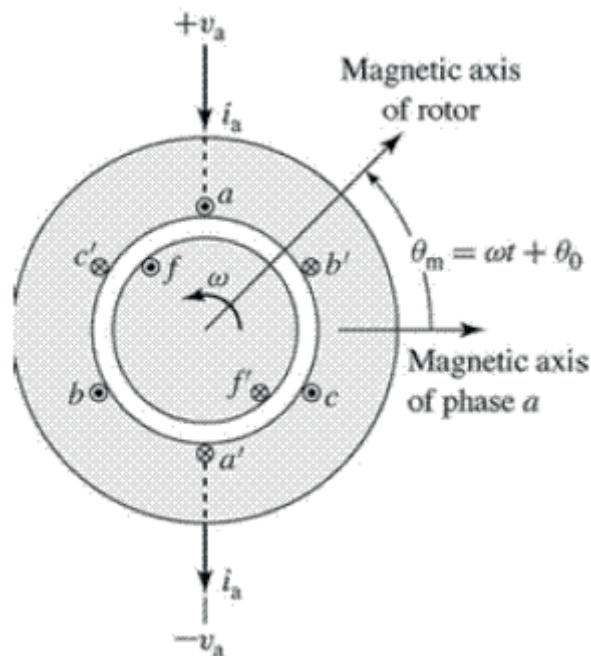
Em um motor síncrono, há correntes que circulam no enrolamento de campo e produzem um campo magnético estacionário (B_r). Da mesma forma, as correntes que circulam nos enrolamentos do estator produzirão um campo girante (B_s). Os dois campos existentes no motor tendem a se alinhar, ou seja, o campo do rotor tende a se alinhar com o campo girante do estator.

Portanto, para o torque produzido em um motor síncrono de ímãs permanentes, o fluxo magnético dos ímãs no rotor equivale ao campo (B_r), assumindo que este é excitado por uma corrente de campo de valor constante e o campo oriundo das correntes que circulam no estator (B_s), estando estes estacionários entre si, tendo a mesma velocidade angular e com uma defasagem entre eles diferente de zero. O ângulo de defasagem é expresso em (θ_m) graus mecânicos ou radianos:

$$\theta_m = \omega t + \theta_0; \quad (1)$$

ωt é a velocidade angular em função do tempo e θ_0 é o ângulo entre o eixo direto no referencial e o eixo magnético da fase (a).

Figura 9. Diagrama esquemático de um motor síncrono trifásico



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Para a produção de um torque eletromagnético líquido em um circuito trifásico ligado em estrela, de acordo com a Lei das Correntes de Kirchhoff, é necessário que, durante cada intervalo de 60° elétricos, haja uma fase conduzindo uma corrente positiva ($+I$), outra fase que tenha uma corrente negativa ($-I$) e uma fase em que a corrente seja zero em um circuito aberto.

Se as bobinas estão conectadas em série, em qualquer instante de tempo, temos duas fases em condução. Dessa forma, segundo Miller (1989), durante qualquer período de 120° elétricos de condução de correntes de fase, a potência instantânea que está sendo convertida de elétrica para mecânica é dada pela Equação 2.

$$P = \omega T_e = 2eI. \quad (2)$$

O número 2 na Equação (2) surge pelo fato de duas fases estarem conduzindo. De acordo com a Lei de Faraday, a tensão de uma espira é igual à variação temporal do fluxo enlaçado, em que $d\delta/dt = \omega_m$, para um ângulo de condução $0 \leq \delta \leq \pi/2$. Conforme Mohan (2015), temos o pico em $\delta = \pi/2$ radianos para o fluxo enlaçado na bobina, sendo $\lambda_{bobina} = (\pi r l) B_g$ em cada bobina uma Fem induzida conforme mostra a Equação (3).

$$e_{bobina} = 2B_g l r \omega_m. \quad (3)$$

Conforme Miller (1989), usando a derivada da expressão anterior para Fem , o torque eletromagnético é dado pela Equação (4)”:

$$T_e = 4N_s B_g l r I = k_T I, \quad (4)$$

Expresso em Nm/A, sendo essa equação válida para qualquer número de par de polos. A constante de torque $k_T = 4N_s B_g l r$, em que l representa o comprimento do rotor, r o raio, N_s o número de condutores em série, B_g densidade de fluxo uniforme cruzando o entreferro e I a corrente elétrica. Segundo Miller (1989), as equações da Fem e do torque podem ser escritas na forma das Equações (5) e (6).

$$E = k\Phi\omega_m \quad (5)$$

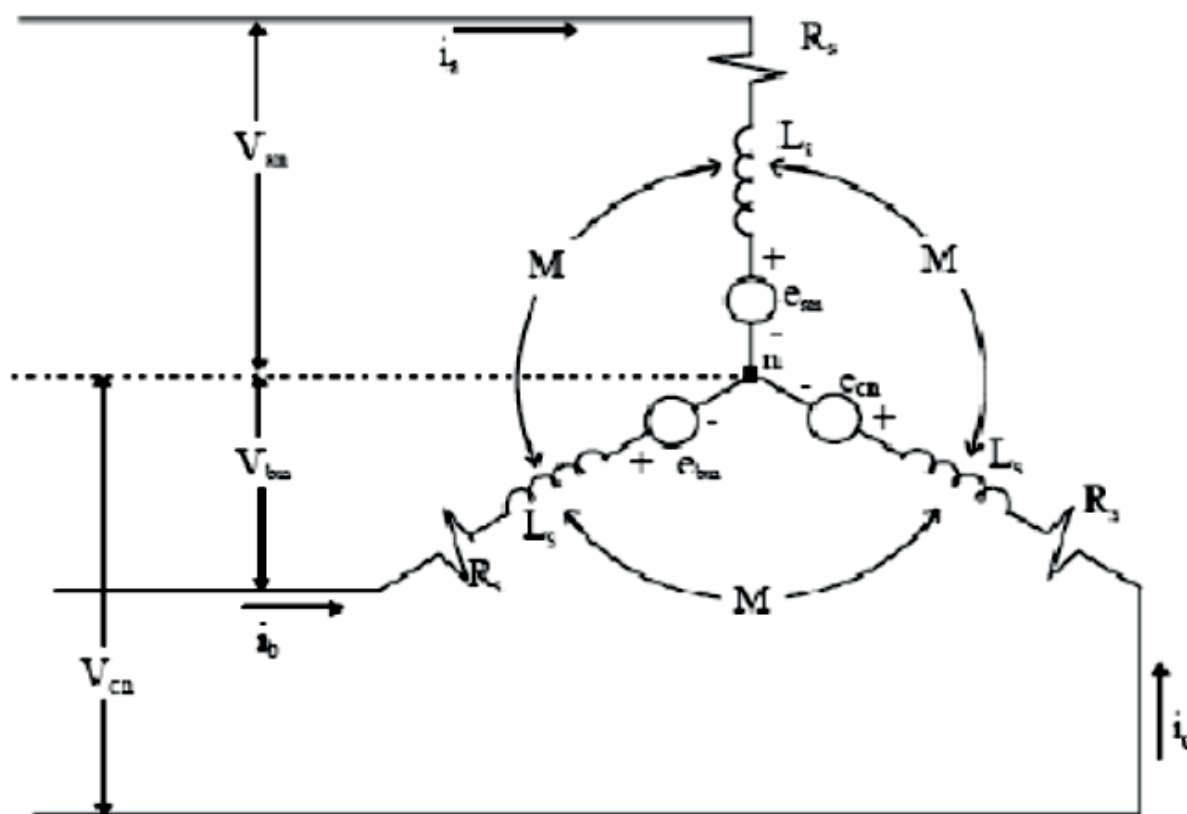
$$T = k\Phi I \quad (6)$$

Modelagem matemática

A modelagem matemática deve ser realizada por meio de analogias que devem ser obtidas de maneira que o campo magnético possa ser calculado através de um circuito magnético análogo a um circuito elétrico, em que um ímã permanente pode ser representado por uma fonte de fluxo.

Dessa forma, o motor pode ser modelado por uma composição de uma resistência (R), uma autoindutância (L) e uma tensão interna (e), em que as tensões internas (e_A), (e_B) e (e_C) representam a força contraeletromotriz.

Figura 10. Representação do circuito elétrico análogo ao magnético



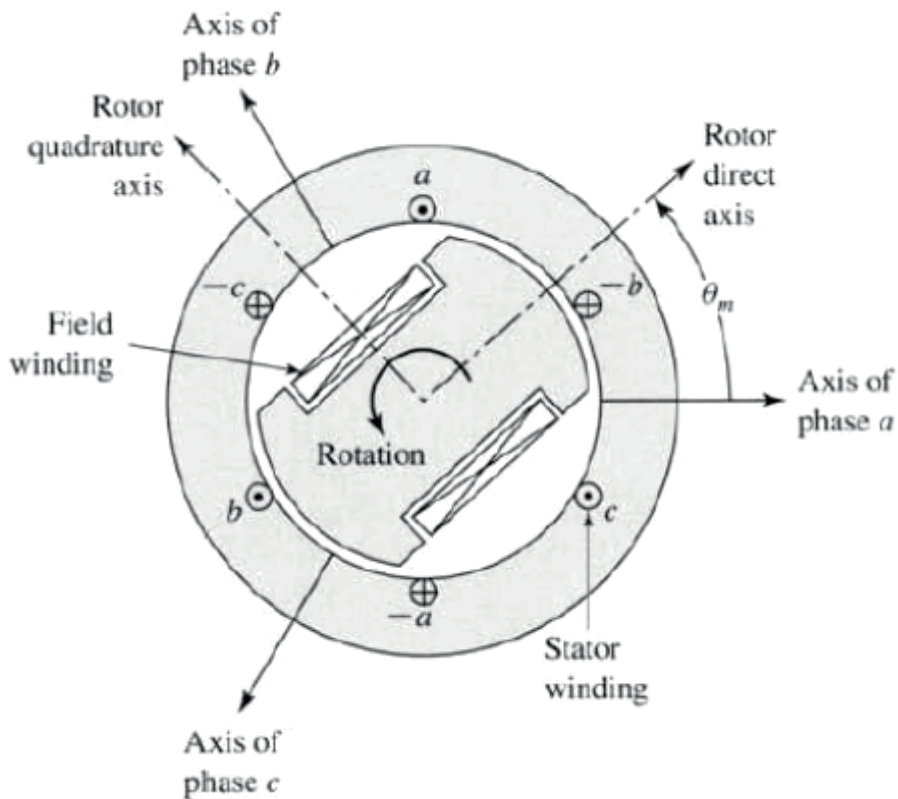
Fonte: Monteiro (1997).

Transformada $dq0$

Em 1920, R. H. Park transformou ou referenciou as variáveis do estator para um sistema referencial $dq0$ no rotor. As indutâncias para uma máquina trifásica, por exemplo, tornaram-se independentes da posição do rotor e, portanto, invariantes no tempo.

A transformada de *Park* para uma máquina síncrona é utilizada para transformar as variáveis do estator em um referencial $dq0$ no rotor. O eixo direto (d) é alinhado ao eixo magnético do ímã e o eixo em quadratura (q) está defasado em 90° do eixo (d), podendo estar atrasado ou adiantado, conforme convencionado.

Figura 11. Referencial dq transformada de Park



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

A própria transformação, conhecida como transformada $dq0$, pode ser representada de forma direta nos termos para o ângulo elétrico θ_{me} (igual a $P/2$ vezes o ângulo espacial θ_m) e entre o eixo direto do rotor e o eixo da fase (a) do estator. A letra S refere-se à grandeza a ser transformada (corrente, tensão e fluxo).

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\text{sen}(\theta_{me}) & -\text{sen}(\theta_{me} - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta_{me} + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Há a sua inversa, conforme mostra a Equação (8).

$$\begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & -\text{sen}(\theta_{me}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta_{me} - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + 120^\circ) & -\text{sen}(\theta_{me} + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

Os subscritos d e q representam os eixos direto e em quadratura, respectivamente. Um terceiro, o componente de sequência zero, indicado pelo subscrito 0, é igualmente incluído. Esse componente é necessário para produzir uma única transformação nas grandezas das três fases do estator. É correspondente aos componentes da corrente de armadura, o qual não produz o fluxo do entreferro e, por isso, nenhum fluxo líquido do circuito do rotor.

Em condições equilibradas de três fases, não há componentes de sequência zero. Somente há condições equilibradas de três fases, que são consideradas nesse trabalho. Essa transformação $dq0$ é aplicada para valores instantâneos a serem transformados, não para valores em *rms*.

De acordo com Krishnan (2001), desconsiderando as correntes induzidas no rotor pelos componentes harmônicos do estator e perdas por dispersão no núcleo do ferro, temos o equacionamento para o circuito.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{bmatrix}; \quad (9)$$

Nessa equação V_a , V_b e V_c representam as tensões; R_a , R_b e R_c as resistências; i_a , i_b e i_c as correntes; e_a , e_b e e_c as Fem 's; L_a , L_b e L_c são as indutâncias do estator das fases a, b, e c, respectivamente. As indutâncias mútuas entre as fases do estator são representadas por M_{ab} , M_{ac} , M_{ba} , M_{bc} , M_{ca} e M_{cb} e V_n é a tensão do terminal neutro.

Considerando que as três fases são equilibradas e simétricas em rotor de polos lisos, podemos dizer que as indutâncias das fases a, b e c e as indutâncias mútuas entre as fases a, b e c possuem o mesmo valor. Sendo a soma das correntes nula e o terminal de neutro isolado, podemos reescrever a Equação (9) da seguinte forma, representada pela Equação (10):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (10)$$

De acordo com a Lei das Tensões de Kirchhoff, o valor instantâneo da tensão da fase (a) do motor pode ser representado pela Equação (11):

$$V_a = e_a + R \cdot i_a + (L - M) \cdot \frac{\partial i_a}{\partial t} - V_n \quad (11)$$

(e_a) é a fem induzida pela excitação do ímã permanente em uma única fase do enrolamento de armadura, (i_a) é a corrente instantânea na fase (a), (R) é a resistência da armadura por fase, (L) é a indutância por fase e (M) é a indutância mútua.

A equação dinâmica para um sistema rotativo pode ser expressa pela Equação (12).

$$J * \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m = T_e - T_c \quad (12)$$

D é o coeficiente de atrito viscoso do eixo da máquina expresso em [N.m.s]; J é o coeficiente do momento de inércia [Kg m²]; T_c é o torque aplicado ao eixo pela carga [N.m]. A velocidade angular mecânica está descrita na Equação (13).

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{p}{2} * \omega_m \quad (13)$$

P é o número de polos e ω_r é a velocidade angular do rotor expressa em [rad. s⁻¹].

Isolando os termos diferenciais das equações, obtemos o sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_b}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_c}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-D}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a - e_a + V_n \\ V_b - e_b + V_n \\ V_c - e_c + V_n \\ T_{el} - T_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para a solução do sistema de equações diferenciais ordinárias mostrado na Equação (14), utilizamos um método de integração numérica para podermos obter as variáveis desejadas, que são i_a , i_b , i_c , ω_m e θ_r .

Com os valores das correntes elétricas por fase e da posição do rotor, obtidos com a simulação temporal, podemos utilizá-los em um programa de elementos finitos para a obtenção de grandezas eletromagnéticas por meio da resolução do sistema de equações diferenciais, como o campo magnético.

Acionamento

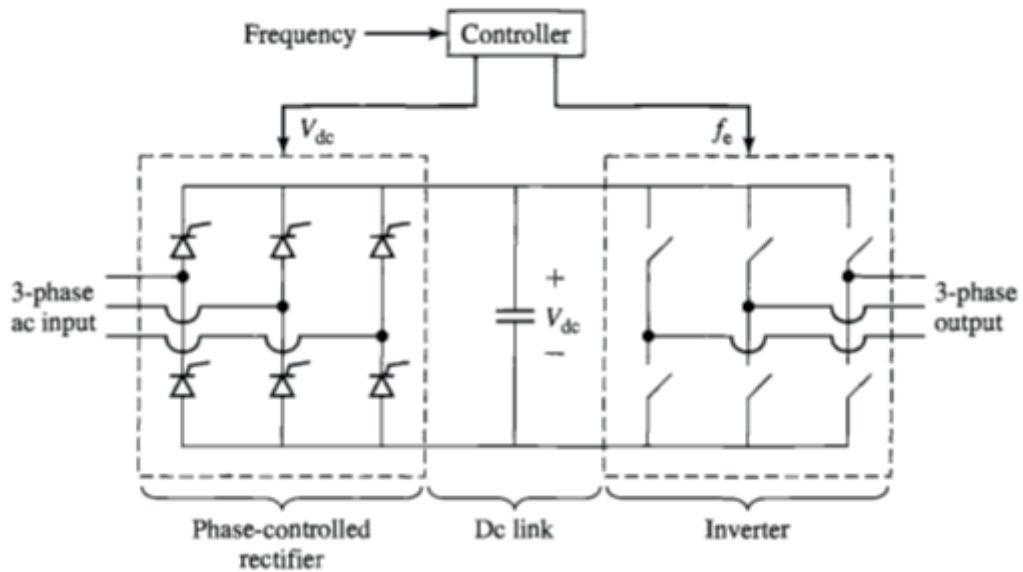
A modulação da tensão de alimentação do motor BLDC é feita por meio de um inversor de frequência, que tem como princípio de funcionamento converter o sinal de corrente alternada da rede em corrente contínua e novamente em alternada, mas agora com um sinal modulado, no qual é possível alterar tanto a amplitude quanto a frequência do sinal de saída.

O inversor é composto, basicamente, por um retificador controlado ou não controlado e por um inversor trifásico, ligados por um elo CC. A função desse elo é melhorar o sinal de tensão CC fornecido pelo retificador, tornando-o mais regular para o inversor trifásico.

É constituído, basicamente, de componentes capazes de armazenar energia elétrica na forma de corrente ou tensão, dependendo da configuração do inversor. Os inversores que utilizam capacitores são chamados de inversores de tensão imposta, e os que utilizam indutores como inversores, de corrente imposta.

Os retificadores podem ser classificados como controlados ou não controlados e de acordo com o número de fases de entrada, ou ainda sendo de meia onda ou onda completa.

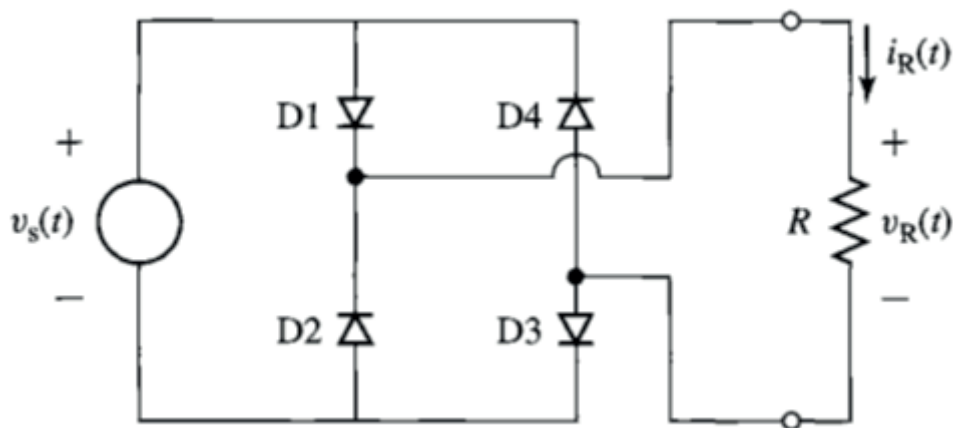
Figura 12. Inversor trifásico



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Neste trabalho, foram abordados apenas os retificadores não controlados, que utilizam diodos. A figura a seguir mostra um retificador de onda completa monofásico.

Figura 13. Retificador de onda completa monofásico



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Considerando os diodos ideais, podemos assumir que os diodos D_1 e D_3 estão conduzindo quando $V_s(t)$ for maior ou igual a zero, e os diodos D_2 e D_4 quando $V_s(t)$ for menor que zero. A fonte de tensão $V_s(t)$ pode ser descrita pela Equação (15).

$$V_s(t) = V_0 * \text{sen } \omega t. \quad (15)$$

Sendo a tensão de pico V_0 na Equação (15) dada pela Equação (16).

$$V_0 = V_{eficaz} * \sqrt{2}. \quad (16)$$

Ainda, a velocidade angular ω expressa pela Equação (17).

$$\omega = 2\pi * f. \quad (17)$$

A tensão média retificada pode ser calculada pela Equação (18).

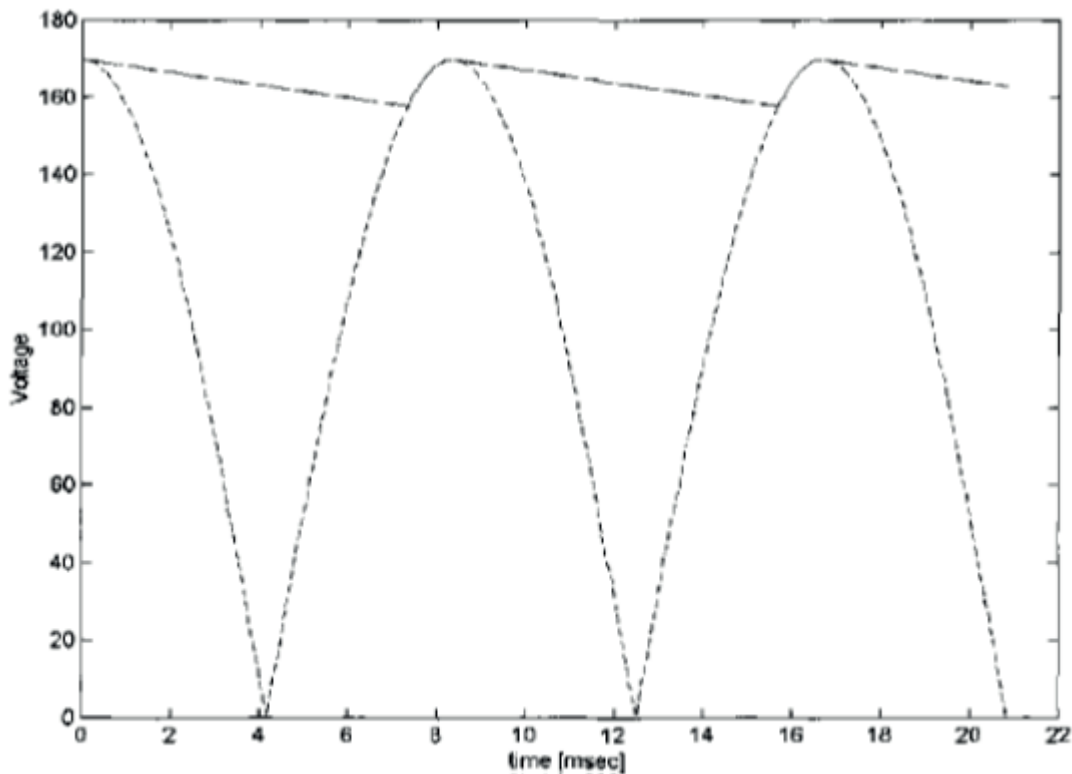
$$V_{cc} = \frac{2}{\pi} * V_0. \quad (18)$$

As formas de onda retificadas não são exatamente as ideais para a maioria das aplicações, pois possuem flutuações, mas podem ser corrigidas por meio da utilização de um capacitor de filtro ligado em paralelo no elo CC.

Como mencionado anteriormente, para filtrar essas ondulações, o capacitor é carregado no instante de tempo em que a tensão de saída do retificador atinge o valor máximo.

Ainda, passa a fornecer tensão para a carga no instante de tempo em que a tensão retificada se torna menor do que a tensão nos terminais do capacitor, tornando a forma de onda CC mais constante. Na figura a seguir, estão representadas as formas de onda retificadas com e sem o capacitor de filtro.

Figura 14. Formas de onda retificadas em ponte de onda completa

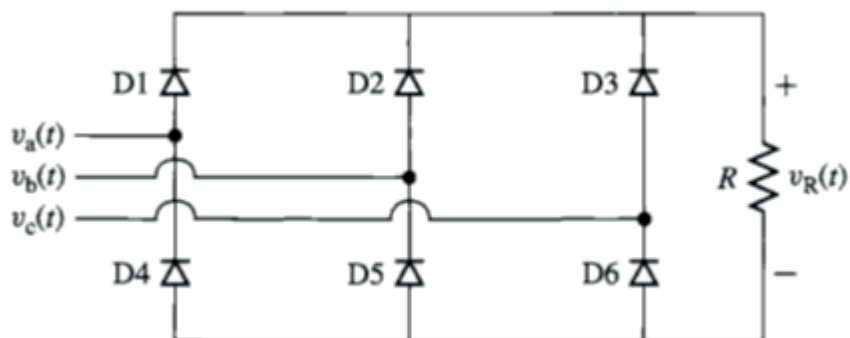


Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Embora muitos sistemas com potências de até cinco ou mais quilowatts usem potência monofásica, a maioria dos sistemas de grande porte é alimentada com fontes trifásicas.

Um retificador de onda completa trifásico pode ser analisado da mesma forma e considerando seus diodos ideais.

Figura 15. Retificador trifásico a seis pulsos com carga resistiva



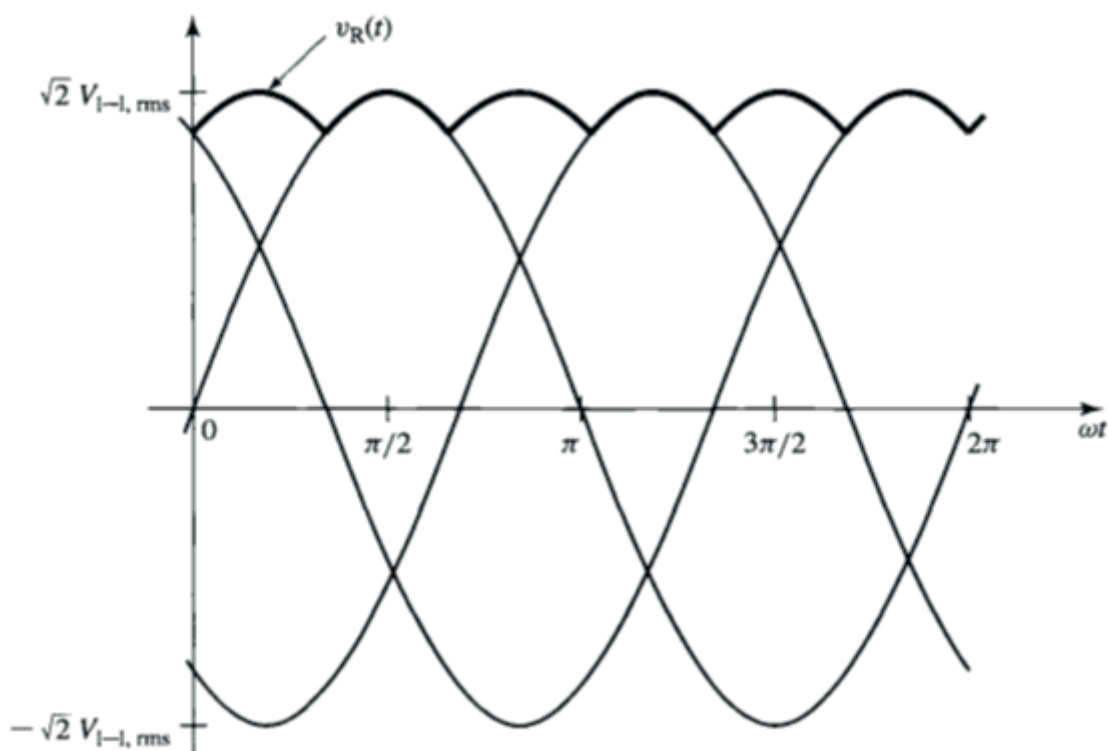
Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

A tensão retificada na carga V_{CC} pode ser obtida por meio da Equação (19).

$$V_{CC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_0 \tag{19}$$

Na Equação (19), o valor da tensão eficaz utilizado para calcular a tensão de pico é igual à tensão de linha, ou seja, à tensão entre fases.

Figura 16. Formas de onda de alimentação do retificador trifásico e da tensão VCC na carga



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Ainda, são apresentadas as sequências de chaveamento dos diodos do retificador trifásico referentes ao período. Podemos notar que cada diodo irá conduzir durante um terço de um ciclo de 120° e que apenas dois diodos estão conduzindo em qualquer instante de tempo no período de 2π radianos.

Tabela 1. Tempo de condução de retificadores trifásicos a diodo

α_d	$0-\pi/3$	$\pi/3-2\pi/3$	$2\pi/3-\pi$	$\pi-4\pi/3$	$4\pi/3-5\pi/3$	$5\pi/3-2\pi$
D1	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
D2	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
D3	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
D4	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
D5	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
D6	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF

Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Os transistores de potência (IGBT's), que serão usados para modular a forma de onda de tensão e corrente, devem ter a forma de onda da força eletromotriz (fem) de fase com um platô de 120° elétricos. Se cada fase for alimentada por 120° elétricos por uma corrente constante, a conversão de potência é dada pela Equação (20).

$$e_1 i_1 = T_e \omega_m. \quad (20)$$

Se a corrente e a fem forem constantes nesse intervalo, o torque produzido também será constante. Em um motor conectado em estrela, a cada 60° elétricos, uma mesma corrente vai circular por duas fases conectadas em série e as FEMs dessas fases se somam. Segundo Nau (2015, p. 32):

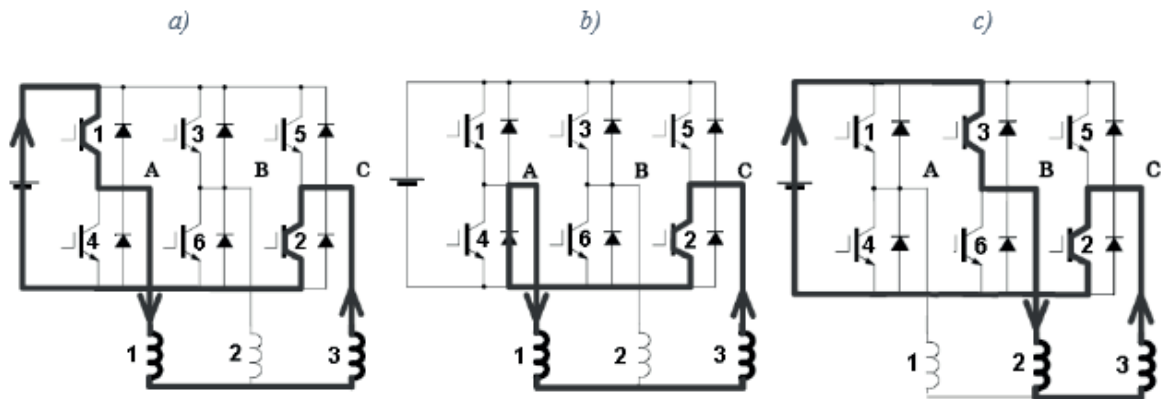
Modo de condução em duas fases, comportamento semelhante ao motor de ímãs com comutador mecânico e o número de fases do motor *brushless DC* são equivalentes ao número de bobinas ligadas ao comutador de um motor dc.

Cada fase produz o torque durante dois intervalos de 120° elétricos, com semiciclos positivos e negativos da fem e da corrente. O torque total é a soma dos torques produzidos por duas fases que se somam a cada 60° elétricos, existindo seis blocos de torque em cada ciclo elétrico. Há, assim, uma comutação de fase a cada 60° elétricos, totalizando seis comutações por ciclo, controle do tipo *six-step* (seis passos).

Quando duas fases estão em condução, na terceira não há circulação de corrente, porém existe uma fem entre os seus terminais e nos terminais das outras fases. A comutação entre duas fases ocorre quando fem de linha passa por zero, ou seja, quando as fases 1 e 2 estão em condução. Ainda, a comutação para 1 e 3 ocorre quando a fem de linha entre as fases 1 e 3 passa por zero. Apenas dois transistores estão em condução em qualquer instante de tempo a partir de 30° elétricos e cada um deles é conduzido por 120° elétricos.

A figura a seguir mostra os laços de condução de fase de um sistema de acionamento em ponte de um motor ligado em estrela. As fases 1 e 3 estão ligadas e Q1 e Q2 estão conduzindo. Ainda, são mostradas também as fases 1 e 3 com Q2 conduzindo, a corrente recirculando pelo diodo D4 e operando em roda livre. Finalizando, as fases 2 e 3 estão ligadas e Q3 e Q2 conduzindo.

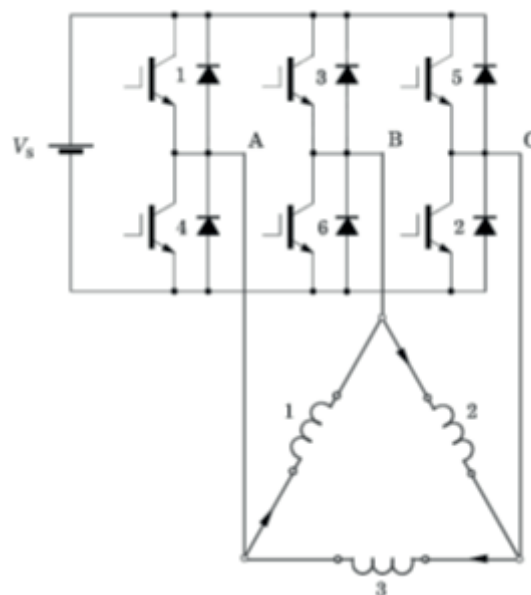
Figura 17. Laços de condução de corrente do motor *brushless* com carga ligada em estrela



Fonte: Nau (2015).

O sistema em ponte pode ser conectado em uma carga ligada em triângulo. Assim, temos três fases ligadas simultaneamente e duas linhas conduzindo corrente, conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 18. Sistema em ponte com carga ligada em triângulo



Fonte: Nau (2015).

Nos próximos tópicos estão descritos dois sistemas de controle que são adequados para o acionamento de motores *BLDC* e suas principais características.

Controle por modulação de largura de pulso

O *driver* utilizado para o acionamento é controlado por meio de um circuito lógico, que necessita de informação sobre a posição do rotor para realizar a correta comutação das fases.

A posição angular mecânica (θ_m), em função do tempo para o campo do rotor, pode ser mensurada por meio de sensores, como um *resolver* ou sensores de efeito hall, que produzem um sinal positivo ou negativo conforme a variação do campo magnético entre norte e sul. Em um motor *brushless* trifásico, três sensores de efeito hall são distribuídos espacialmente em 60° ou 120° graus elétricos. Para motores ligados em delta ou estrela, a comutação é feita da mesma forma.

Quadro 1. Sequência de comutação dos transistores

Posição do rotor (° eletr.)	Linha A	Linha B	Linha C	Fase A		Fase B		Fase C	
				Q1	Q4	Q3	Q6	Q5	Q2
330 - 30	0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
30 - 90	+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
90 - 150	+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
150 - 210	0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
210 - 270	-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
270 - 330	-1	0	+1	0	1	0	0	1	0

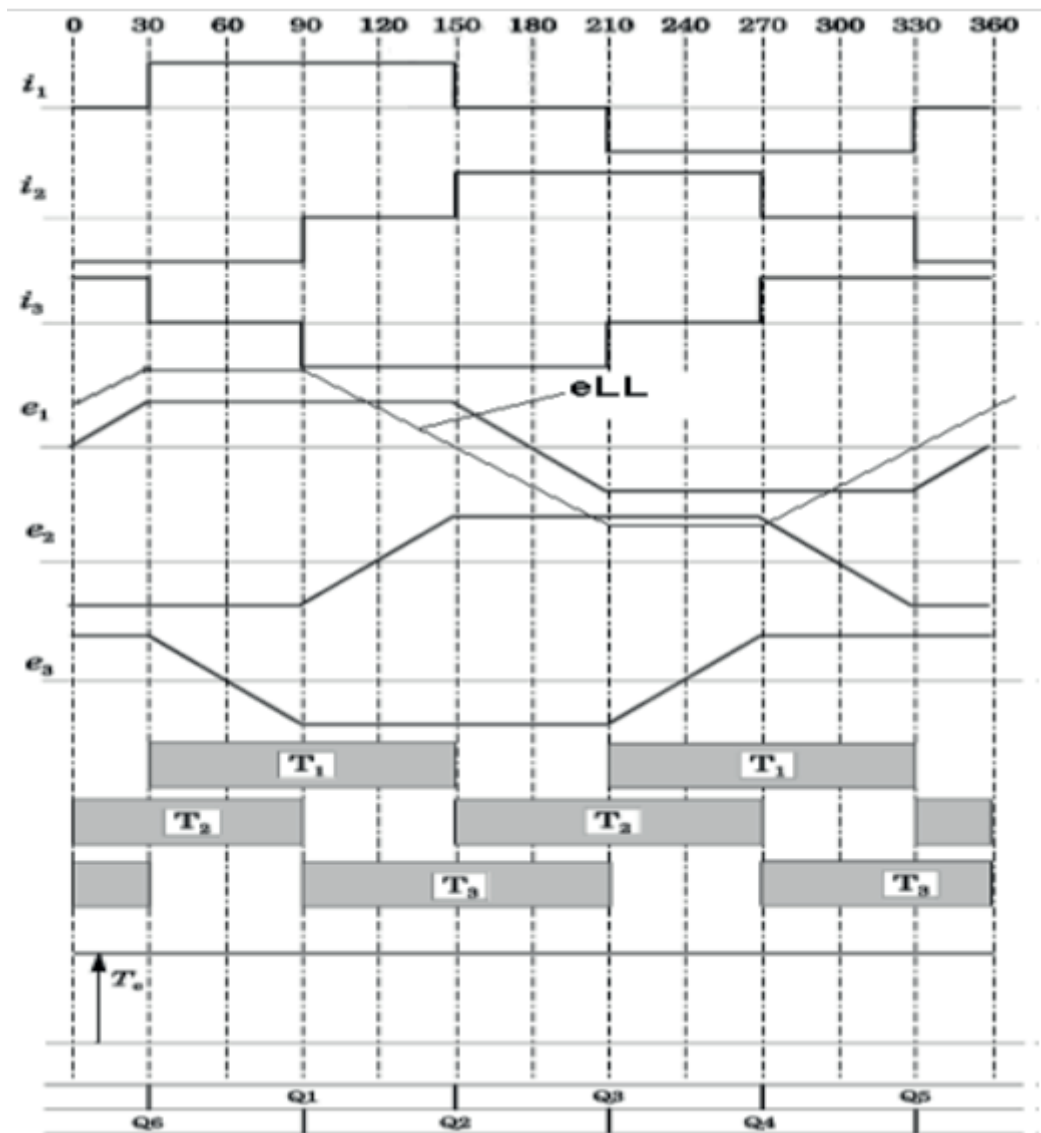
Fonte: Nau (2015).

A modulação do sinal de saída é feita por meio de um sinal de referência MLP (modulação de largura de pulso) ou PWM, que controla a razão cíclica (D). É o produto da divisão do período em que o IGBT está em condução (t_{on}) pelo somatório dos períodos em condução (t_{on}), além do período em que o IGBT está em bloqueio (t_{off}). Essa razão é diretamente proporcional ao nível de tensão nos terminais do BLDC. O PWM utiliza uma frequência de chaveamento que varia entre 5 e 10 kHz.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (21)$$

A figura a seguir mostra as formas de onda de tensão e corrente de um motor *brushless DC*, de acordo com a posição angular mecânica do rotor (θ_m).

Figura 19. Formas de onda tensão e corrente de um motor brushless DC



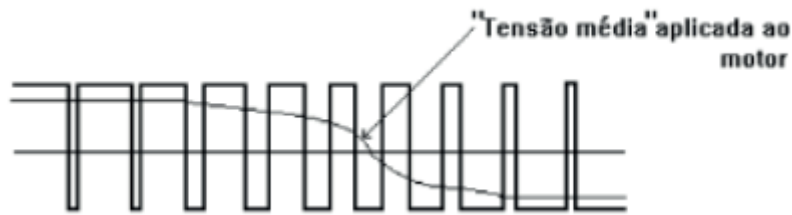
Fonte: Nau (2015).

Sendo a tensão nos terminais do BLDC obtida pela seguinte Equação (22).

$$V_s = V_0 * D. \quad (22)$$

A figura a seguir mostra um sinal de controle por modulação de largura de pulso, assim como a forma de onda resultante.

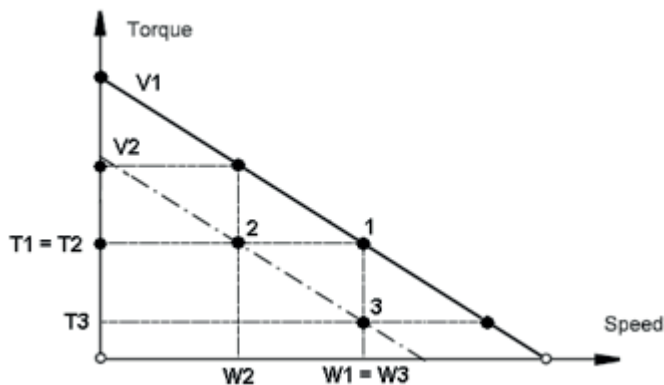
Figura 20. Sinal de MLP e forma de onda da tensão nos terminais do BLDC



Fonte: Nau (2015).

O controle de torque do BLDC é feito por meio da realimentação do circuito e por meio de sensores de corrente em duas fases do motor ou um sensor no elo CC. Podemos relacionar o torque, a rotação e a tensão apenas mantendo a tensão constante. O torque do motor aumentará e a rotação diminuirá. O torque é mantido constante para dois níveis de tensão com o aumento da velocidade.

Figura 21. Curva de torque de um motor BLDC



Fonte: Nau (2015).

Sistema de controle vetorial

Com o intuito de diminuir o conteúdo harmônico e melhorar o aproveitamento do barramento CC, Van der Broek, em 1986, propôs uma técnica baseada na teoria de vetores espaciais para máquinas de corrente alternada, chamada de Modulação Vetorial. Essa técnica de controle consiste em acionar as chaves por meio de cálculos de seus tempos de comutação e não mais através de comparação entre um sinal de onda moduladora e uma portadora triangular.

Assim, foi possível diminuir o conteúdo harmônico, reduzir o número de comutações das chaves e aumentar sua vida útil, melhorando o aproveitamento do barramento CC em torno de quinze por cento.

Esse conceito é derivado do campo girante da máquina com alimentação modulada através de um inversor. Esse tipo de modulação transforma as grandezas trifásicas em referenciais de dois eixos, sendo o eixo direto e em quadratura por meio da transformada $dq0$, sendo respectivamente um alinhado com as grandezas do estator e o outro em quadratura.

A velocidade angular síncrona é diretamente proporcional à frequência elétrica da tensão de armadura aplicada e inversamente proporcional ao número de polos da máquina.

$$\omega_s = \frac{2}{\text{polos}} * \omega_e \quad (23)$$

Sendo ω_s a velocidade espacial síncrona da onda de fmm no entreferro dada em rad/s, ω_e é a frequência angular de excitação elétrica aplicada em rad/s sendo igual a $2\pi f_e$. O subscrito f_e é a frequência elétrica aplicada em Hz.

Conforme Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006), em uma máquina síncrona de ímãs permanentes, com a corrente de campo efetiva equivalente e fixada pelos ímãs permanentes, a corrente do eixo em quadratura é determinada diretamente pelo conjugado desejado.

Podemos representar o produto equivalente da indutância mútua entre o rotor, o estator (L_{af}) e a corrente de campo (I_f) como Λ_{IP} , considerando um motor trifásico de tensão eficaz de fase em circuito aberto (E_{af}) nominal na frequência elétrica (ω_e).

$$\Lambda_{IP} = \frac{\sqrt{2} * (E_{af})_{nominal}}{(\omega_e)_{nominal}} \quad (24)$$

Se a corrente i_D de referência for tomada como sendo igual a zero, podemos dizer que o fluxo concatenado no eixo direto (λ_D) terá o mesmo valor de Λ_{IP} .

Assim, o fluxo concatenado do eixo em quadratura (λ_Q) pode ser obtido pelo produto da corrente de eixo em quadratura.

$$\lambda_Q = L_s * i_Q + \Lambda_{IP} \quad (25)$$

Podemos obter o fluxo de fase eficaz pela Equação (26).

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{\lambda_D^2 + \lambda_Q^2}{2}} \quad (26)$$

O torque eletromagnético (T_{mec}) de uma máquina síncrona submetida ao controle vetorial pode ser expresso pela Equação (27).

$$T_{mec} = \frac{3}{2} \left(\frac{\text{Polos}}{2} \right) \Lambda_{IP} i_Q \quad (27)$$

Na Equação (27), o subscrito i_Q se refere à corrente do eixo em quadratura obtida pela transformação $dq0$.

$$i_Q = -\frac{2}{3} [i_a \sin \omega t + i_b \sin(\omega t - 120^\circ) + i_c \sin(\omega t + 120^\circ)] \quad (28)$$

Utilizando a mesma técnica, obtemos a corrente i_D .

$$i_D = \frac{2}{3} [i_a \cos \omega t + i_b \cos(\omega t - 120^\circ) + i_c \cos(\omega t + 120^\circ)] \quad (29)$$

Sendo as correntes i_a , i_b e i_c respectivamente dadas pelas Equações (30), (31) e (32).

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin \omega t; \quad (30)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (31)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + 120^\circ). \quad (32)$$

Podemos determinar a corrente de referência $(i_Q)_{ref}$ conforme a Equação (33).

$$(i_Q)_{ref} = \frac{2}{3} \left(\frac{2}{\text{pólos}} \right) \frac{T_{ref}}{\Delta_{JP}}. \quad (33)$$

Na Equação (33), T_{ref} se refere ao torque desejado para o conjugado de potência.

O próximo passo será determinar um valor para $(i_D)_{ref}$ e com o objetivo de reduzir as tensões geradas nos terminais da máquina para que não ultrapassem o valor da tensão nominal. A corrente $(i_D)_{ref}$ pode ser calculada pela Equação (34).

$$(i_D)_{ref} = \frac{\lambda_D - \Delta_{JP}}{L_s}. \quad (34)$$

Determinadas as correntes $(i_D)_{ref}$ e $(i_Q)_{ref}$, temos a corrente eficaz de armadura pela Equação (35).

$$I_a = \sqrt{\frac{(i_D)_{ref}^2 + (i_Q)_{ref}^2}{2}}. \quad (35)$$

Essa técnica é conhecida como enfraquecimento de fluxo e é obtida a partir do aumento das correntes de armadura. São usadas aplicações que necessitam operar a máquina acima da velocidade nominal. O ponto de operação é escolhido por um compromisso da redução da tensão de armadura e por um aumento da corrente de armadura.

Para determinar o ponto de comutação das chaves, obtemos um vetor de referência \vec{V}_{ref} , que gira em plano complexo com módulo e em velocidade síncrona constante, ou seja, a transformada não alterou as características trifásicas fundamentais.

$$\vec{V}_{ref} = V_m e^{j\omega t}. \quad (36)$$

Conhecendo o princípio de operação de um motor BLDC acionado por um inversor trifásico e considerando que as chaves de um mesmo braço são complementares, identificamos que há apenas oito combinações de comutação possíveis. Aplicada a transformada $dq0$, obtemos as equações (36), (37), (38), (39), (40), (41), (42) e (43).

$$\vec{V}_0 = \frac{2}{3} \left(-\frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = 0. \quad (36)$$

$$\vec{V}_1 = \frac{2}{3} \left(+\frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc}. \quad (37)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{2}{3} \left(+\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (38)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{2}{3} \left(-\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (39)$$

$$\vec{V}_4 = \frac{2}{3} \left(-\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{j\pi} \quad (40)$$

$$\vec{V}_5 = \frac{2}{3} \left(-\frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (41)$$

$$\vec{V}_6 = \frac{2}{3} \left(+\frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{j\frac{5\pi}{3}} \quad (42)$$

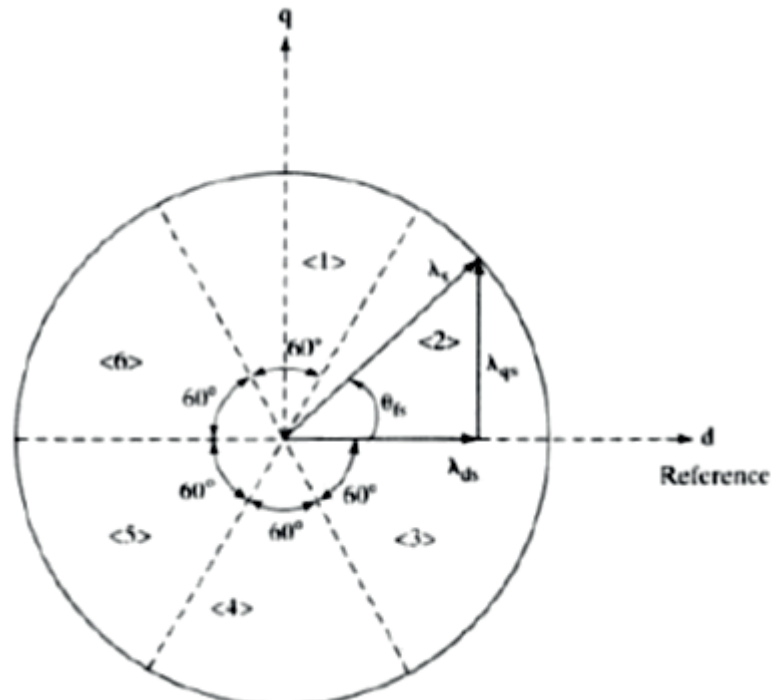
$$\vec{V}_7 = \frac{2}{3} \left(+\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{V_{cc}}{2} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = 0 \quad (43)$$

Observamos que, das equações obtidas, apenas seis transferem energia do elo CC para a carga e são chamadas de vetores ativos. As demais são chamadas de vetores nulos por não transferirem energia para a carga, sendo os vetores \vec{V}_0 e \vec{V}_7 e estando as chaves nas posições 000 e 111, respectivamente.

Sabendo-se que a chave no estado 0 está desligada e no estado 1 ligada, neste último estado o resultado obtido para a equação é 0, pois trata-se de um sistema trifásico equilibrado e as tensões de alimentação estão defasadas entre si em 120° elétricos.

Podemos representar esses vetores em um plano complexo $\alpha - \beta$ em um círculo. Os vetores ativos estão defasados entre si em 60° e formando seis setores.

Figura 22. Representação dos seis setores ativos em um plano complexo

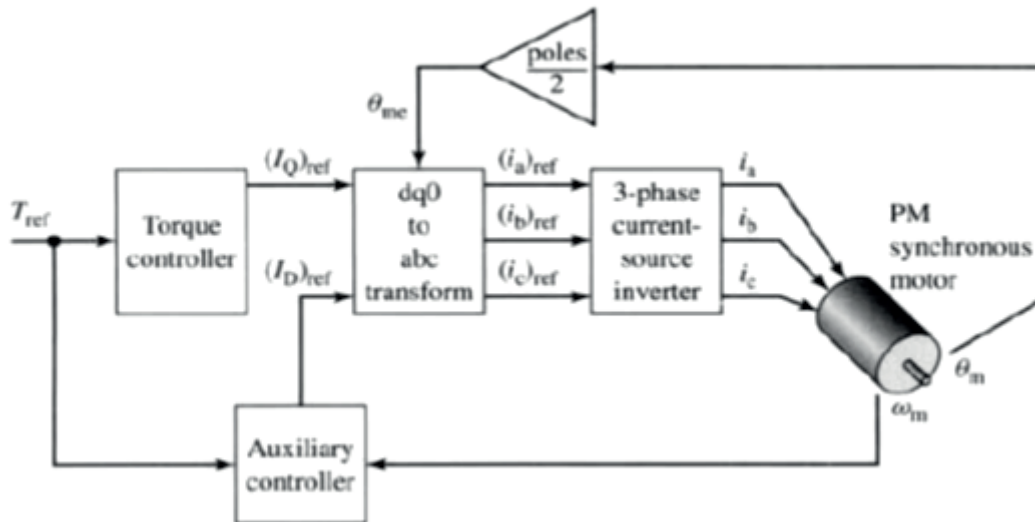


Fonte: Krishnan (2001).

Assim, podemos determinar a posição do rotor e a velocidade para realizar o correto acionamento das chaves, bem como modelar o sinal de PWM para acionamento.

A figura a seguir mostra um diagrama de blocos de um sistema de controle de conjugado por campo orientado ou controle vetorial para um motor síncrono de ímãs permanentes.

Figura 23. Diagrama de blocos de controle vetorial para um motor síncrono de ímãs permanentes



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006).

Materiais e métodos

Para a elaboração deste trabalho, buscamos conhecer os princípios básicos do funcionamento de uma máquina síncrona trifásica com rotor de ímãs permanentes. Conhecidas as particularidades sobre a construção, formas de operação e controle, bem como possíveis aplicações das máquinas no setor industrial, optamos pela modelagem matemática de uma máquina síncrona trifásica de ímãs permanentes de onda trapezoidal. Buscamos averiguar a viabilidade para a implementação das máquinas que compensassem um maior custo inicial para sua implementação.

As soluções em sistemas são as ações que proporcionam as maiores reduções de consumo de energia e eficiência energética. São uma combinação de motores de alta eficiência com controle de rotação por inversores de frequência. Há a acentuação da economia de energia do conjunto, pois o motor passa a entregar somente o esforço necessário ao trabalho, sem desperdício (SILVA; NEVES, 2015, p. 55).

Em diversos setores da indústria, podemos obter uma melhora considerável com a utilização de motores com maior eficiência e sistemas de variação e controle de velocidade.

Tabela 2. Soluções de eficiência energética nos sistemas industriais

Sistema industrial	Solução eficiente	Economia	Outros benefícios
Torres de resfriamento	Motor alta eficiência + inversor + transmissor de temperatura	Até 80%	Redução do consumo água e insumos.
Filtro de mangas	Motor alta eficiência + inversor + transmissor de pressão	Até 60%	Vida útil mangas e redução do consumo ar comprimido.
Silos de grãos	Motor alta eficiência + inversor	Até 90%	Qualidade do produto e controle do nível do silo e teor de umidade.
Injetoras	Motor alta eficiência + inversor	Até 60%	Suavidade de operação e redução da temperatura do óleo.
Extrusoras	Motor alta eficiência + inversor	Até 30%	Redução de custos de manutenção.
Moinho de bolas	Motor alta eficiência + inversor	Até 40%	Redução do tempo de batelada e custos de manutenção.

Fonte: Silva e Neves (2015).

Definido o modelo da máquina a ser estudado, foram identificadas as grandezas necessárias para a modelagem matemática do BLDC, bem como as variáveis independentes necessárias para a formulação da modelagem matemática da máquina.

Por meio de uma analogia entre o circuito magnético e o circuito elétrico equivalente, realizamos a modelagem matemática a partir da transformada $dq0$, segundo a modelagem descrita em Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umas (2006), que descreve as relações básicas das máquinas síncronas com a transformada de Park.

Definidas as equações, buscamos identificar os principais elementos que compõem o circuito de acionamento do inversor, sendo eles a ponte retificadora, o elo CC e o módulo de IGBT, bem como descrita sua funcionalidade.

Para determinar o método de controle do inversor, foram analisados dois modelos de sistemas de controle, sendo eles o controle por modulação de largura de pulso e o controle vetorial. Foi feita a aplicação do controle vetorial para o industrial em consequência da robustez do sistema e do menor número de componentes no circuito da placa inversora.

Definido o método de controle, foram pesquisados componentes capazes de atender às solicitações operacionais do sistema, que serão apresentados nos próximos tópicos.

O inversor

O atual desenvolvimento da eletrônica aplicada aos módulos de potência aponta para uma tendência cada vez maior na construção de módulos mais compactos e que integram não somente os transistores de potência para o acionamento de máquinas, mas também os *drivers*.

As diversas funcionalidades dos *drivers* facilitam a construção de placas cada vez mais compactas, por incluírem, em alguns casos, circuitos de proteção e melhora na segurança na aplicação.

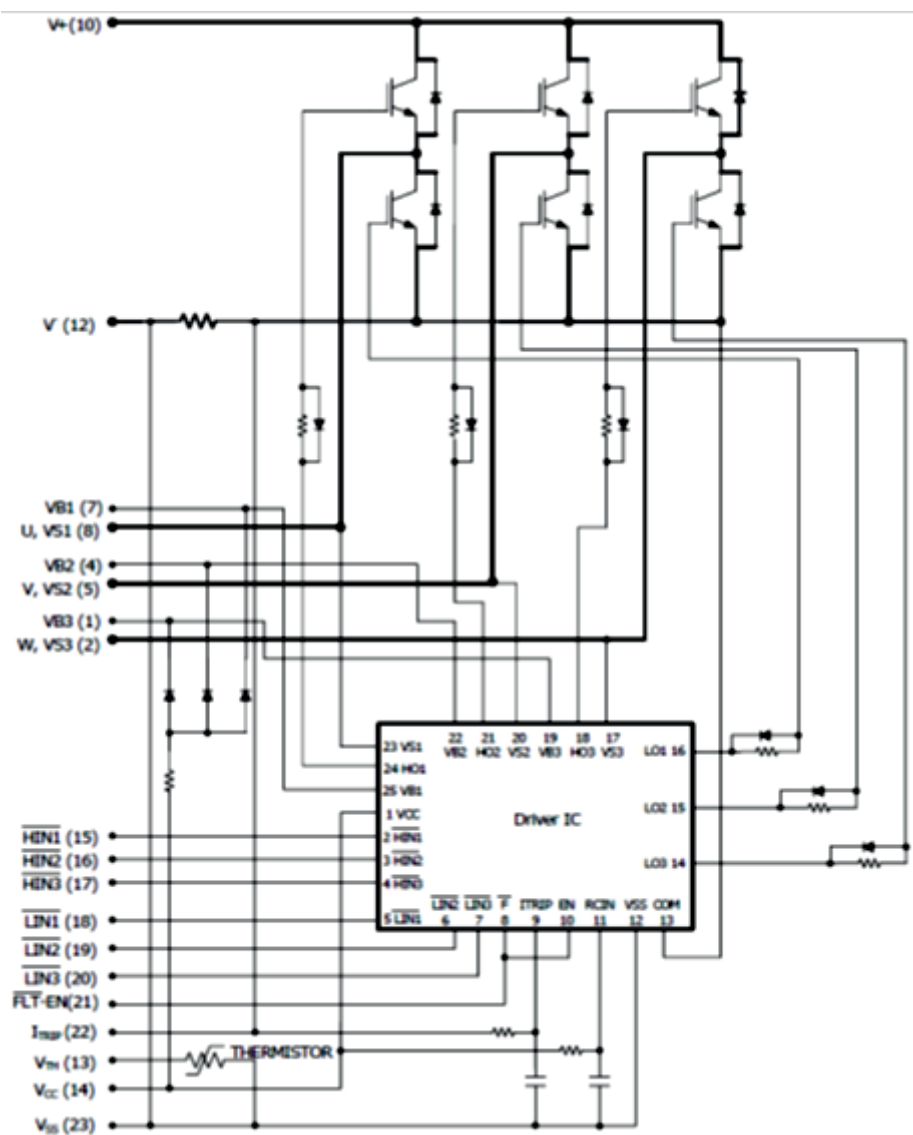
A maioria dos *drivers* comercializados é de baixa e média potência. Em casos que necessitam de potências mais elevadas, podemos adotar a utilização de *drivers* externos, os quais também apresentam grandes evoluções nos últimos anos.

Para este projeto, optamos pela utilização do módulo de ponte inversora trifásica IRAMX16UP60B, produzido pela empresa *International Rectifier*®. A empresa possui diversos *drivers* necessários para o acionamento das chaves, bem como circuitos de proteção e desligamento contra sobrecorrente e temperatura.

Ainda, *dead-time* interno para a proteção contra curto-circuito na fonte, lógica de proteção contra condução cruzada, pinos de baixa tensão no emissor dos IGBT's para controle de corrente, entrada lógica em *Schmitt Trigger*, *drivers* de porta e diodos de *Bootstrap* integrados, além de encapsulamento totalmente isolado.

O diferencial do componente é que as chaves e os *drivers* estão em um mesmo encapsulamento, podendo operar em uma faixa de tensão de 85 ~ 253 Vac e em uma corrente de 16 A RMS.

Figura 24. Diagrama elétrico interno do IRAMX16UP60B

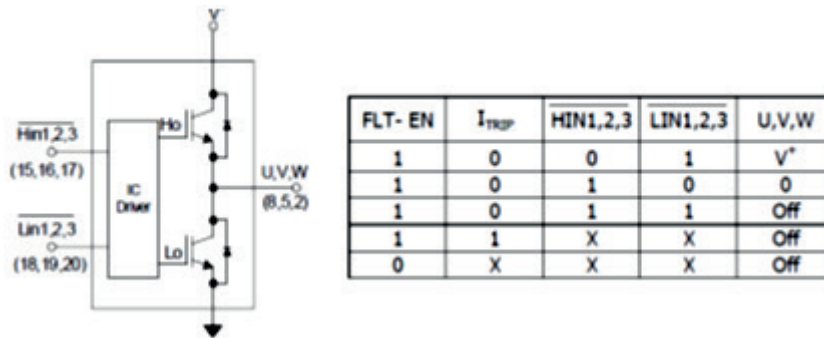


Fonte: International Rectifier's (2017).

O controle de comutação das chaves é feito por meio das entradas digitais $H_{in}1$, $H_{in}2$, $H_{in}3$ e os pinos 15, 16 e 17 controlam as chaves superiores e as entradas $L_{in}1$, $L_{in}2$, $L_{in}3$. Os pinos 18, 19 e 20 controlam as chaves inferiores.

Devemos observar que as entradas digitais de controle operam com lógica invertida. Assim, quando o nível das entradas $H_{in}1$, $H_{in}2$, $H_{in}3$ indicar nível baixo, o nível de saída da chave Ho será alto, acionando as chaves superiores. A mesma lógica é válida para as entradas $L_{in}1$, $L_{in}2$, $L_{in}3$, conforme o diagrama simplificado a seguir.

Figura 25. Diagrama simplificado do acionamento das chaves na ponte de IGBT

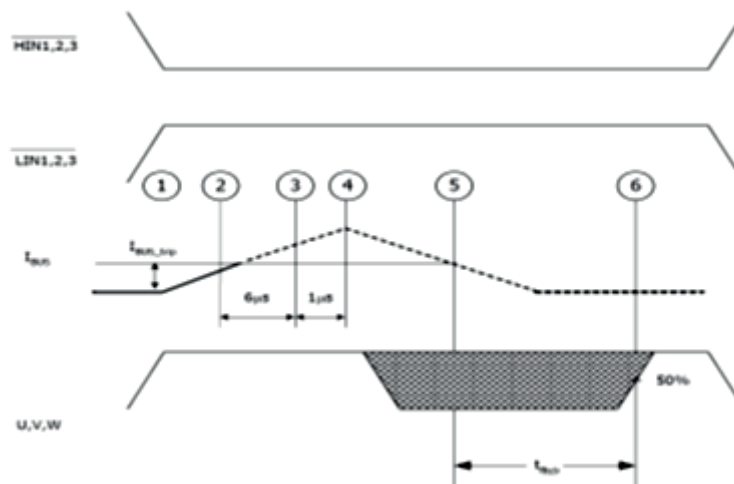


Fonte: International Rectifier's (2017).

A quantidade de chaves acionadas ao mesmo tempo depende do método de controle, sendo no mínimo duas e no máximo três. Devemos lembrar que duas chaves do mesmo braço não podem ser acionadas ao mesmo tempo, evitando curto-circuito na fonte de alimentação. Entre as entradas digitais da ponte e o controlador, utilizamos acopladores ópticos para podermos isolar diferentes níveis de potência.

O sinal emitido através do pino I_{TRIP} é responsável pelo desligamento do módulo em caso de alta temperatura e corrente. Esse sinal pode ser gerado tanto pelo circuito interno de monitoramento de temperatura quanto por uma lógica externa utilizada para proteção. O tempo de atuação desse sinal é de 150 nanossegundos e a temperatura interna máxima do módulo é de 150 °C.

Figura 26. Acionamento do ITrip por meio da mensuração da corrente no barramento de saída



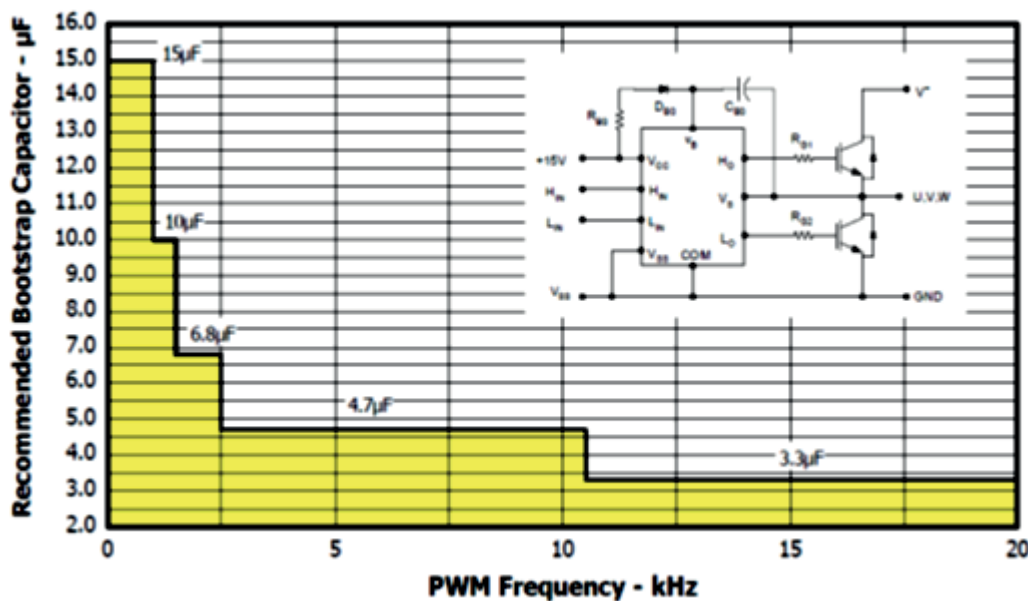
Fonte: International Rectifier's (2017).

O funcionamento acontece da seguinte forma: em 1 a corrente I_{bus} começa a subir e entre 2 e 3 ela ultrapassa o nível de I_{bus_Trip} por 6 microssegundos. Entre 3 e 4 ocorre um *delay* de um microssegundo entre a identificação de sobrecorrente do *driver* e o desligamento de todas as saídas; em 4 a corrente começa a decrescer até atingir zero; em 5 a corrente está abaixo do nível de I_{bus_Trip} e o *driver* começa o *reset* em seguida e, em 6, o *driver* é reiniciado automaticamente.

Em uma condição normal, podemos resumir que a condição de curto-circuito deve ser removida no momento em que o *driver* se redefine automaticamente.

O capacitor utilizado para mensurar a corrente na saída *Bootstrap* é ajustado. O resistor e o diodo já estão integrados ao circuito, sendo apenas necessária a utilização do capacitor externo.

Figura 27. Gráfico com a representação simplificada do circuito de Bootstrap

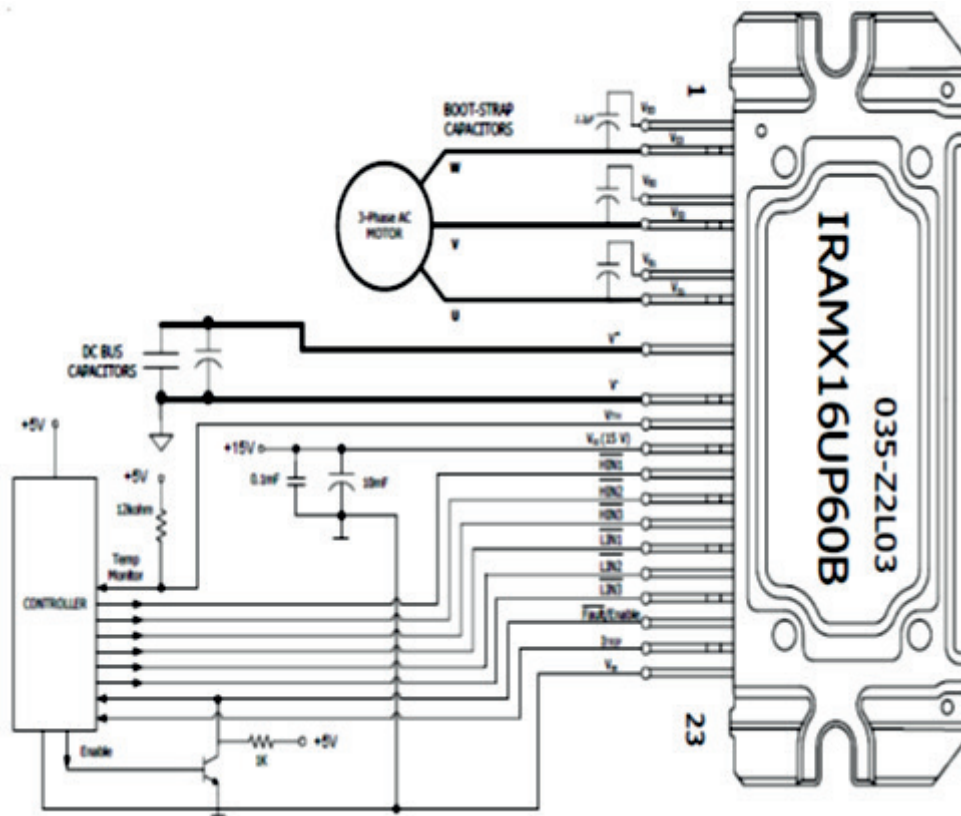


Fonte: International Rectifier's (2017).

Outra função importante integrada ao módulo é o *dead-time* que, como foi citado anteriormente, é o tempo de atraso entre a comutação das chaves de um mesmo braço de condução, evitando curtos-circuitos. Em aplicações convencionais, a ação não é feita por meio da programação no microcontrolador ou através de circuitos externos.

A figura a seguir mostra o diagrama do funcionamento do módulo com os componentes externos necessários ao seu funcionamento.

Figura 28. Esquema típico de aplicação do módulo



Fonte: International Rectifier's (2017).

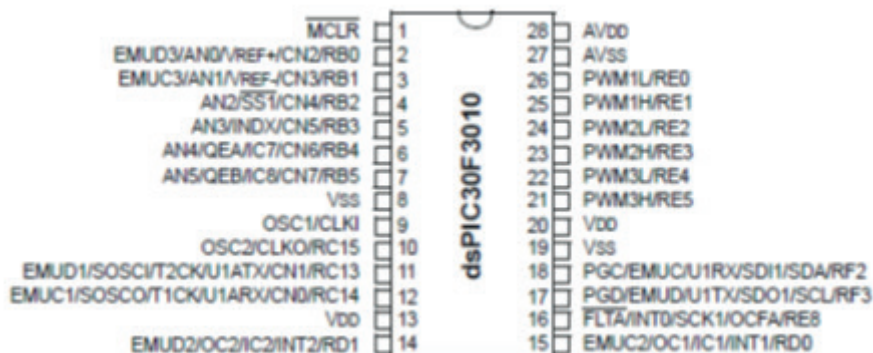
O microcontrolador

Para este projeto, foi adotado o microcontrolador da família PIC30F da *Microchip*, modelo PIC30F3010, com 28 pinos. Possui módulo caracterizado para controle de motores, seis canais de PWM independentes e modo de bordas e centro alinhado.

Apresenta três geradores de *duty cycle*, contador de base dedicado, polaridade de saída programável, controle de *dead-time* para modo complementar, manual de controle das saídas e *trigger* ou gatilho (um recurso de programação que é disparado sempre que um evento associado ocorre).

A alimentação do microcontrolador é feita por meio da aplicação de uma tensão CC de no mínimo três volts e no máximo de cinco volts. Também é necessária a utilização de um cristal para a geração de *clock*, de 4MHz.

Figura 29. Microcontrolador PIC30F3010



Fonte: Microchip Technology Inc. (2017).

A *Microchip* também fornece um software para programação, chamado de dsPIC30F Software. Em aplicações motoras utilizando um BLDC, o ruído audível e as ondulações de torque são um problema. É desejável operar o motor através de referenciais senoidais ao invés de tensões de seis passos, neste contexto. O software permite que o controlador de sinal digital dsPIC30F possa operar o motor BLDC de forma eficiente e robusta.

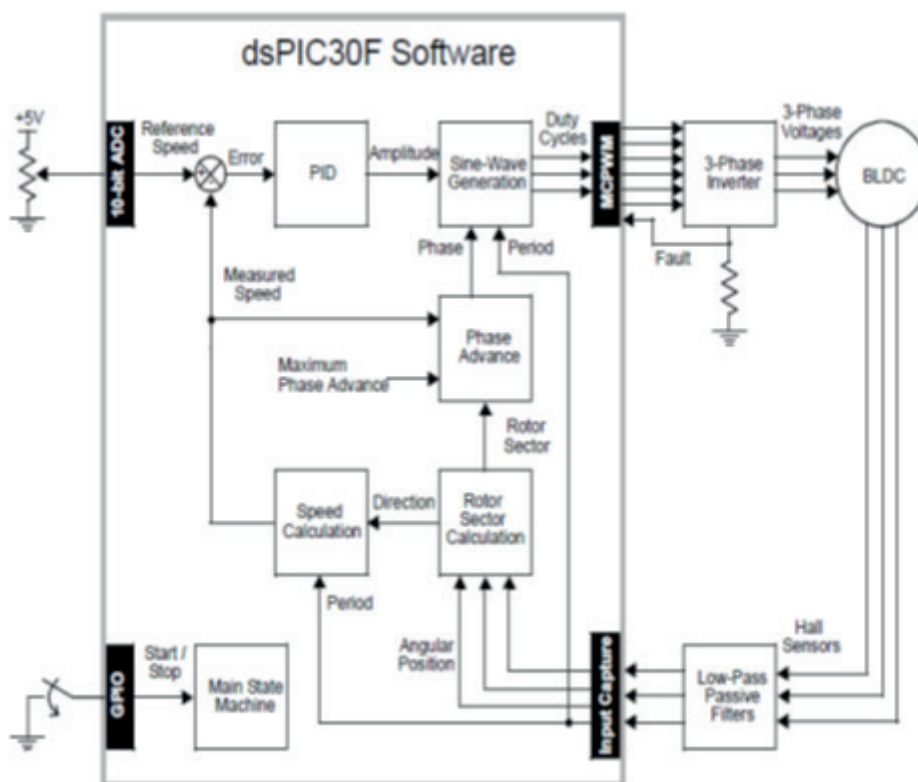
O software possui modos periféricos e que são adequados à aplicação. O conversor de dez bits analógico e digital captura as entradas (ADC) e gera sinais discretos proporcionais, oferecendo funcionalidades essenciais para a operação do software.

O uso de algoritmos para controle em circuito fechado PID, a eliminação da necessidade de geradores de PWM externos e dispositivos de detecção de corrente caros não só aumentam a eficiência, mas reduzem o custo da aplicação.

O diagrama de blocos a seguir descreve o funcionamento do software. O programa é executado em um loop fechado e com base na diferença da velocidade desejada e da velocidade real. Ainda, o ajuste da velocidade é feito por meio de uma tensão de referência.

A velocidade real é medida por meio de sensores de efeito hall que, por meio de interpretações proporcionais, cálculos integrais e derivadas do erro de velocidade, determinam a amplitude do referencial de tensão, o qual controla o motor com rapidez.

Figura 30. Diagrama de blocos do dsPIC30F



Fonte: Microchip Technology Inc. (2017).

Em um primeiro instante, o motor é iniciado por um interruptor externo, inicializando todas as variáveis e com os periféricos habilitados. Por meio de um sinal de referência, é estabelecida a velocidade desejada e o sistema ajusta a tensão entregue ao motor. Na primeira parte do circuito fechado, o sinal de referência é lido pelo conversor analógico e digital, estabelecendo um valor de software chamado de velocidade de referência.

A segunda parte do circuito fechado mensura a velocidade real do motor e ajusta a tensão de acordo com o erro calculado entre a velocidade de referência e a velocidade real. Na aplicação do software, são necessários sensores de efeito hall para poderem detectar a posição do rotor.

Os sinais gerados pelos sensores são condicionados por filtros passivos para poderem produzir pulsos que possam ser lidos e medidos pelas capturas de entrada do módulo de controle. Um dos sensores de efeito hall é usado para medir o período, que deve ser conhecido por duas razões.

A primeira calcula a velocidade do motor para o controlador em circuito fechado e a segunda mantém o seno da onda de fase bloqueado na posição angular do rotor. Os sinais gerados pelos três sensores são utilizados para serem obtidos a posição angular do rotor e o sentido de rotação. Assim, as medidas da posição angular do rotor são avaliadas para determinar em qual dos setores o vetor de referência é obtido por meio de cálculos.

As medidas são comparadas à última leitura para se determinar o sentido da rotação do motor, o qual é utilizado juntamente com a medição do período do módulo de captura de entrada. Nesse cálculo, o valor constante é dividido pelo período e é adicionado um sinal para indicar a direção de rotação do motor. O resultado é o valor de velocidade medido utilizado para

calcular o erro de velocidade.

A velocidade medida é subtraída da velocidade de referência para determinar o erro, que determina se o motor deve acelerar ou diminuir, com o objetivo de garantir uma operação suave do motor.

O erro é analisado em valores proporcionais, integrais e derivados para produzir uma saída composta que é usada para compensar o erro de velocidade. A saída dos cálculos de controle de velocidade PID é um valor de tensão definido como amplitude.

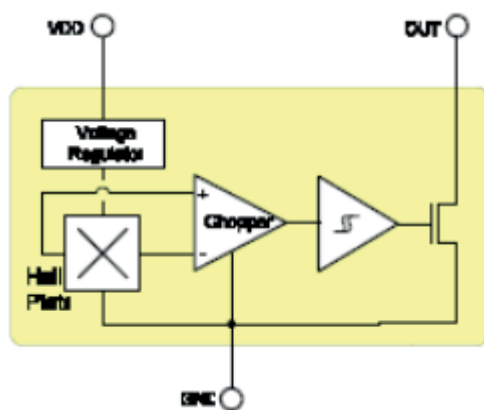
Sensores de efeito hall

O sensor de efeito hall US1881, fabricado pela *Melexis Microelectronic Integrated Systems*, é um dispositivo que contém um circuito integrado que utiliza a tecnologia CMOS, um amplificador linear, um amplificador de entrada e um *schmitt trigger* em um único encapsulamento de silicone.

Ainda possui um regulador de tensão integrado ao circuito, que permite a alimentação em uma grande faixa de tensão, sendo compreendida entre 3,5 volts e 24 volts. Fornece uma corrente de saída de 20 mA e com uma tensão de 24 V, podendo ser feita a condução direta do sinal de saída. Pode operar com uma frequência DC de saída de mais de 10 kHz.

Inicia a operação em nível lógico baixo. Após o polo sul de um ímã abordar sua face, comuta para o nível lógico alto. Comuta novamente para o estado de nível lógico baixo quando atingido pelo norte. Ambos os campos magnéticos são necessários para a operação do circuito.

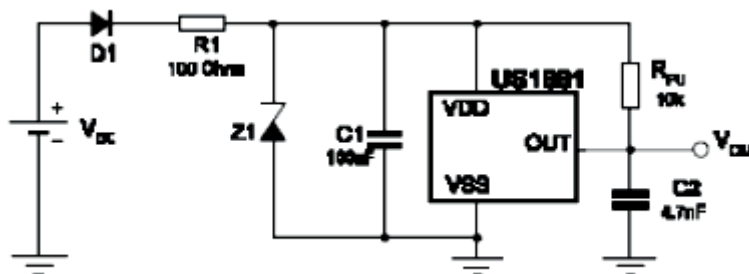
Figura 31. Diagrama de blocos do sensor de efeito Hall US1881



Fonte: Melexis (2017).

Os sensores são utilizados para mensurar a posição e a velocidade do rotor. São dispostos ímãs que têm a mesma distribuição espacial dos ímãs utilizados na confecção do rotor do motor.

Figura 32. Circuito sensor de efeito hall com filtro passa baixa



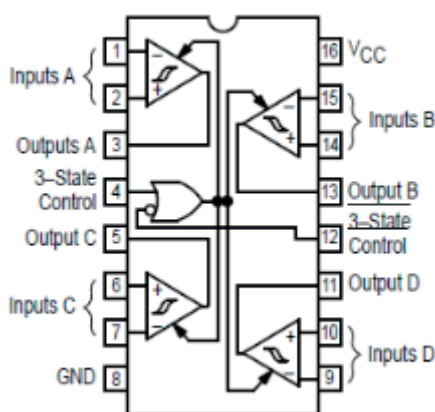
Fonte: Melexis (2017).

Leitor dos sensores hall

Os sinais provenientes dos sensores de efeito hall são muito ruidosos e é necessária a utilização de um circuito de interfase que possa filtrar esses sinais. Assim, empregamos um receptor de linha diferencial, o chamado AM26LS32, fabricado pela Motorola. Tem uma alimentação de no máximo 5 volts, fornece uma corrente de saída de 50 mA e as entradas podem operar com uma tensão máxima em torno de 25 volts.

O circuito integrado possui quatro canais independentes, além da opção de três estados, para manter as saídas em nível alto quando o sinal de entrada for zero. Devemos ter um nível alto no pino quatro e o pino 12 aterrado.

Figura 33. Receptor de linha diferencial



Fonte: Motorola (2017).

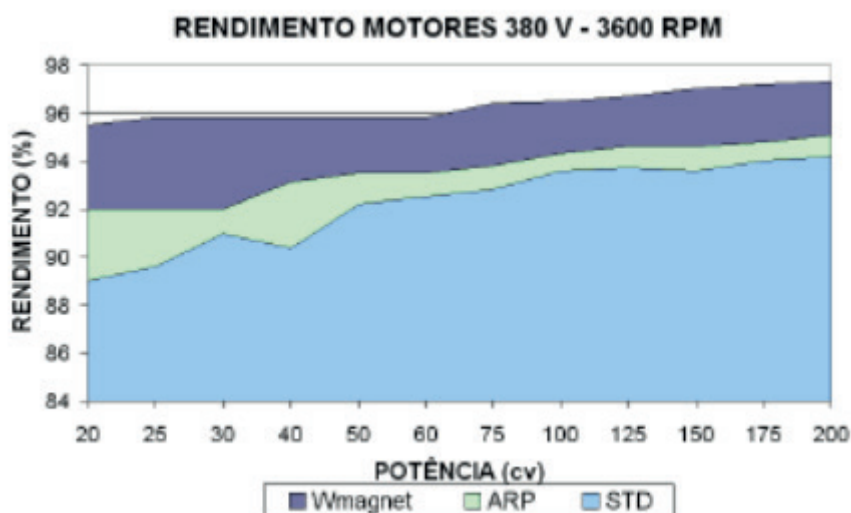
Resultados e discussão

Apesar dos custos iniciais para a aquisição e instalação de motores síncronos, em muitos casos podemos obter benefícios na utilização de motores síncronos de ímãs permanentes em consequência dos ganhos superiores obtidos através dos baixos custos operacionais.

Quando o rendimento dos motores se torna a consideração básica para a escolha do motor, um motor síncrono com fator de potência (FP) unitário ou acima de 96% é usualmente a solução.

Considerando que a potência reativa (KVAR) não é necessária e sim a potência ativa (KW), a corrente de armadura é minimizada, resultando em menores perdas (I^2R) e no enrolamento do estator. Assim, os motores síncronos de ímãs permanentes podem operar em condições térmicas melhores do que os motores de indução equivalentes. A figura a seguir mostra uma comparação entre os motores síncronos de ímãs permanentes (*WMAGNT*), motores de alto rendimento (*ARP*) e motores de indução da linha *Standart* (*STD*), fabricados pela WEG.

Figura 34. Rendimento de motores síncronos de ímãs permanentes em comparação aos motores de indução

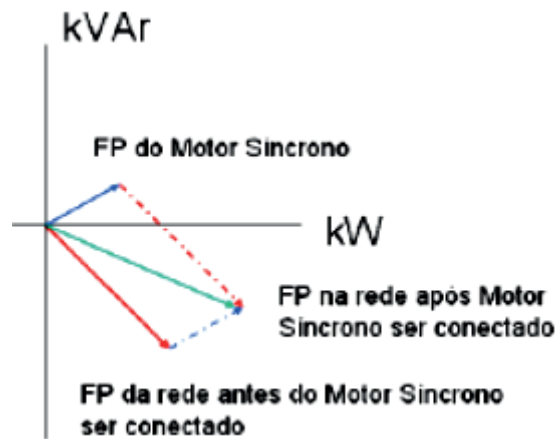


Fonte: WEG (2015).

Outra vantagem relacionada à utilização dos motores síncronos de ímãs permanentes está alinhada à correção do fator de potência. Geralmente, na indústria, são predominantes as cargas reativas indutivas, que são motores de pequeno ou grande porte, transformadores e outros equipamentos que necessitam de uma considerável quantidade de potência reativa consumida como corrente de magnetização. Assim, há um aumento na potência reativa e nos custos com a geração e transmissão de energia.

O motor operando com sistema de regeneração de energia pode fornecer potência útil necessária para a correção do fator de potência do sistema, conforme figura a seguir.

Figura 35. Correção do fator de potência utilizando motores síncronos



Fonte: WEG (2015).

A projeção de um motor com altos torques e baixas correntes de partida acontece em consequência da utilização do circuito de acionamento, o qual controla o nível de tensão na armadura por meio do circuito eletrônico de disparo dos transistores de potência e da utilização da roda de diodos acoplada ao circuito, reduzindo as correntes de partida.

Em motores de indução acionados com inversor de frequência, são necessárias alterações no projeto do motor, afetando diretamente as características de operação nominal do motor.

Tais características e a aplicação de técnicas de controle digitais permitem a implementação de sofisticadas leis de controle, levando em consideração as não linearidades e variações paramétricas ou tolerâncias.

Outro fator em destaque é a baixa suscetibilidade a ruídos, além da ausência dos efeitos do envelhecimento ou da temperatura do circuito de controle.

O sistema de controle vetorial sugerido neste trabalho é considerado adequado à implementação digital, atendendo às especificações dos sistemas. É necessário o controle de velocidade com torque constante na operação de motores síncronos de ímãs permanentes.

A utilização de módulos de controle, além de simplificar a construção da placa, reduzindo o custo do projeto, incorpora diversas funcionalidades que facilitam a operação e proteção do sistema de controle. Ainda, há uma redução nos custos devido ao fato de não ser necessária a utilização de dispositivos de detecção de corrente caros, geradores de PWM externos e outros periféricos necessários para o controle de motores síncronos de ímãs permanentes.

O módulo de potência sugerido, assim como a maioria dos módulos comerciais existentes, é limitado quanto à potência, sendo de média potência. É necessária a instalação de potências maiores, além da utilização de módulos externos.

A utilização de motores síncronos de ímãs permanentes em sistemas com necessária variação de velocidade apresenta maiores ganhos se levarmos em consideração a eficiência energética. Os subscritos E_C , P , $C_{\%}$, N_M , N_h e C_{el} se referem, respectivamente, à economia de energia, potência elétrica dada em *Watts*, carregamento percentual do motor, número de motores, número de horas de trabalho e custo de energia. η_{MIT} e η_{BLDC} são os rendimentos do motor de indução e do motor BLDC.

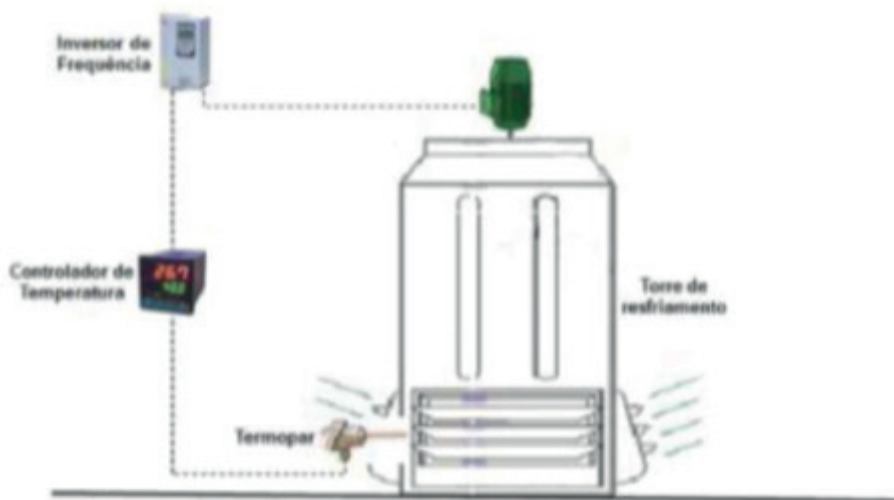
$$E_C = P * C_{\%} * N_M * N_h * \left(\frac{1}{\eta_{MIT}} - \frac{1}{\eta_{BLDC}} \right) * C_{el} \quad (44)$$

Estudo de caso

Torres de resfriamento são equipamentos utilizados amplamente na indústria e são dimensionadas a partir dos valores de vazão e temperatura da água a ser resfriada. Como padrão, são projetadas em função da maior temperatura de bulbo úmido do local de instalação. Esse dimensionamento não leva em consideração as variações de temperatura ao longo do ano e as variações no processo e no consumo de água.

Esse cenário pode ser mudado com o controle de temperatura da água por meio de um sensor e de um controlador. O sinal é transmitido ao inversor de frequência, que varia a rotação do motor do ventilador, insuflando mais ou menos ar.

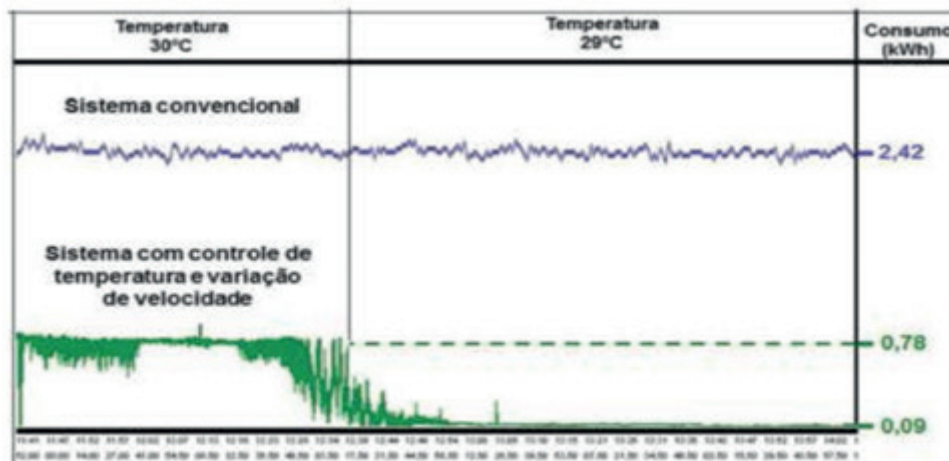
Figura 36. Torre de resfriamento



Fonte: Silva e Neves (2015).

A economia de energia elétrica é de até 80%, além da redução do consumo de energia e os ganhos citados anteriormente. A aplicação apresentou uma expressiva economia de outro item valioso, a água. Houve uma redução de 22% no consumo desse insumo. Após a implementação da solução, o ventilador passou a controlar a temperatura da água de acordo com a real necessidade do processo e, por consequência, a evaporação, que antes ocorria em excesso, diminuiu, gerando ganhos em economia de água. O resultado indicou uma economia de 1.170 litros de água ao dia, o equivalente a 427 mil litros de água ao ano. Esses ganhos foram avaliados com especial atenção às diferenças no volume de produção de cada período, utilizando as mesmas bases para comparação (SILVA; NEVES, 2015, p. 33).

Figura 37. Consumo de energia da torre de resfriamento



Fonte: Silva e Neves (2015).

Aplicações de motores BLDC

Motores BLDC encontram aplicações em vários segmentos de mercado, como aparelhos em geral, controles industriais, automação, aviação. Fora disso, podemos categorizar os tipos de aplicações de motores BLDC em três grandes categorias, as quais são descritas a seguir.

Aplicação com cargas constantes: a variação de velocidade é mais importante do que manter o motor em velocidade constante (exata). As taxas de aceleração e desaceleração não são dinamicamente mudadas. Nesses tipos de aplicação, a carga é acoplada diretamente no eixo do motor. Por exemplo: ventiladores, bombas e exaustores.

Aplicações com cargas variáveis: a carga no motor varia em um limiar de velocidade. A aplicação demanda uma alta velocidade de controle, exatidão e boas respostas dinâmicas. Aplicações domésticas como lavadoras, secadoras e compressores são bons exemplos. No ramo automotivo, bombas de combustível, controle de direção elétrica e controle eletrônico dos vidros e dos para-brisas são bons exemplos. Ainda, na indústria aeroespacial, existem inúmeras aplicações, como bombas centrífugas, controle de braços robóticos, controle de giroscópios etc.

Aplicação de posicionamento: a resposta dinâmica da velocidade e o torque são importantes e também possui rotação reversa. Um típico ciclo da aplicação terá uma fase de aceleração, de constante velocidade e de desaceleração. A carga no motor varia durante todas as fases, causando a necessidade de um complexo controle. Ainda, o sistema opera em malha fechada.

Existem três controles funcionando simultaneamente: controle de torque, controle de velocidade e controle de posição. Codificadores ópticos são usados para medir a velocidade atual do motor. Em alguns casos, os sensores são usados para obter informações sobre a posição relativa do motor. De outra forma, outros sensores de posição são usados para obter a posição absoluta do motor.

Figura 38. Participação da força motriz no consumo de energia na indústria

Setor	Total GWh/a	Força motriz e refrigeração	
		GWh/a	%
Cimento	3.754	3.702	99%
Ferro-gusa e aço	16.889	14.111	84%
Ferro-ligas	7.659	236	3%
Mineração e pelotização	9.292	8.586	92%
Não ferrosos	33.907	10.282	30%
Química	21.612	16.465	76%
Alimentos e bebidas	19.851	16.009	81%
Têxtil	7.776	7.585	98%
Papel e celulose	14.098	13.442	95%
Cerâmica	3.050	2.745	90%
Outros	34.173	23.750	70%
Total	172.061	116.909	68%

Fonte: Silva e Neves (2015).

Conclusão

Este trabalho foi desenvolvido com aporte teórico e contemplou as principais características do BLDC e suas funcionalidades, seguindo a tendência tecnológica de inversores trifásicos e utilizando módulos de potência como elemento principal do sistema de acionamento.

Primeiramente, foram apresentados os modelos de máquinas síncronas de ímãs permanentes, sendo classificados de acordo com a orientação de fluxo ou pela forma de onda da força contraeletromotriz produzida em seus enrolamentos.

Os estudos realizados neste trabalho foram concentrados nas máquinas de fluxo radial e onda trapezoidal, conhecidas como *brushless DC*. Para se obter o sistema de controle, foram apresentados os princípios de funcionamento da máquina e a modelagem matemática. Foram, ainda, apresentados os principais elementos que compõem o circuito de acionamento.

Para definirmos o método de controle, foram comparadas duas técnicas. A primeira por modulação de largura de pulso, a qual modula o sinal de PWM usado para controlar o chaveamento da ponte de IGBT. Converte o sinal de corrente contínua fornecido pelo elo CC em um sinal de corrente alternada modulado por meio da comparação de uma portadora triangular.

A segunda técnica analisada foi a técnica de controle vetorial, a qual consiste em modular o sinal de chaveamento por meio da teoria de vetores espaciais e cálculos dos tempos de comutação das chaves, resultando em uma operação mais suave e com melhor aproveitamento do elo CC, reduzindo o número de comutações das chaves e aumentando sua vida útil.

Após a análise e comparação dessas duas técnicas de controle, foi adequada, para a aplicação em máquinas utilizadas na indústria, a técnica de controle vetorial, em consequência da menor suscetibilidade a ruídos, controle preciso e menor custo de implementação.

A utilização de módulos de potência, como o IRAMX16UP60B, apresenta grandes vantagens com relação à redução de custos. Possibilita a construção de placas mais compactas e permite focar na agregação de novas funcionalidades e não mais na construção do módulo em si.

Contudo, a utilização de módulos comerciais tem a aplicação limitada para máquinas de média potência, mas esse problema pode ser facilmente contornado disponibilizando os sinais de controle em conectores e possibilitando o uso ou a construção de módulos de maior potência.

O sistema de monitoramento e controle, desempenhado pelo microcontrolador dsPIC30F3010, incorpora diversas funções específicas para o controle de motores *brushless* e para o controle vetorial. Facilita a arquitetura do sistema e elimina a necessidade de geradores de pulso externos, aumentando a robustez do sistema e diminuindo a interferência de ruídos externos.

Por meio dos estudos realizados neste trabalho, identificamos que há uma tendência para a substituição de motores CC e de indução em aplicações, nas quais é necessário um controle preciso, além de variação de velocidade por motores síncronos de ímãs permanentes.

Ainda, há o fato da redução dos custos nos processos de fabricação dos ímãs e a evolução constante da eletrônica de potência, objetivando o aumento da eficiência energética no setor industrial e a automatização dos processos de fabricação.

Com os estudos realizados, verificamos que, para trabalhos futuros, podem ser desenvolvidas as placas de circuito do sistema de acionamento proposto. Ainda, técnicas de controle de velocidade *sensorless* através da determinação da posição do rotor e por meio da detecção da passagem da fem por zero na fase que não está energizada.

Referências

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMAS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HENDERSHOT, J. R.; MILLER, T. J. E. **Design of brushless permanent-magnet motors**. Magna Physics Div. Tridelta Industries Inc., Hillsboro, Ohio and Oxford University Press Inc: New York Hillsboro, 1994.

INTERNATIONAL RECTIFIER'S. **IRAMX16UP60B Datasheet**. 2017. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/Iramx16up60b>>. Acesso em: 10 out. 2017.

KRISHNAN, R. **Electric motor drives - modeling, analysis and control**. Ed. Prentice Hall: New Jersey, 2001.

MELEXIS. **US1881**. Hall-effect sensor latch with advanced chopper stabilization. 2017. Disponível em: <http://www.datasheetlib.com/datasheet/1311147/us1881ua_melexis-microelectronic-systems.html>. Acesso em: 10 out. 2017.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **dsPIC30F3010/3011 Datasheet**. 2017. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70141c.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017.

MILLER, T. J. E. **Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives**. New York: Oxford University Press, 1989.

MOHAN, NED. **Máquinas elétricas e acionamentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MONTEIRO, J. R. B. de Almeida. **Estratégias de acionamento e controle em máquinas CA de ímã permanente de fluxo não senoidal**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1997.

NAU, Sebastião Lauro. **Máquinas elétricas especiais, motores de onda trapezoidal**. 2015.

Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net>>. Acesso em: 16 set. 2017.

SILVA, Leandro Ávila da; NEVES, Rodrigo Augusto. Eficiência energética: o investimento necessário para a indústria. **O Setor Elétrico**, ed. 112, 2015.

WEG. **DT6-Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção**. 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net>>. Acesso em: 16 set. 2017.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

CONCENTRADOR PRATO STIRLING: geração de energia limpa e eficiente

Dish stirling concentrator: clean and efficient energy generation

Fredimar Otto¹
Leilson Lima Maciel de Castro²
Marco Antônio Roncada³
Rodrigo Hoepers⁴
Julia Grasiela Busarello Wolff⁵

Resumo: Devido ao aumento constante da população mundial, cresce a necessidade de construir novas usinas para geração de energia elétrica. O aumento populacional, juntamente com a construção de novas usinas tradicionais, gera impactos ambientais. Assim, há um grande aumento no interesse por sistemas de geração de energias renováveis. Um dos sistemas de energia mais limpos conhecidos é a energia solar, e a forma mais tradicional para transformar energia solar em energia elétrica é por meio de placas fotovoltaicas. Entretanto, o sistema de geração ainda possui um rendimento muito baixo. Por esse motivo, este trabalho tem como objetivo apresentar um sistema de geração de energia solar ainda não muito difundido. Este utiliza um prato parabólico para concentrar o calor do Sol em um motor Stirling que, por sua vez, movimentará um gerador elétrico. Dentre os sistemas de energia solar, este é o que possui o maior rendimento, podendo facilmente chegar a 40%. Pretende-se, com este trabalho, aumentar significativamente o conhecimento do leitor em relação a esse sistema de energia, como também despertar o seu interesse em implantá-lo, ajudando na sustentabilidade do planeta, diminuindo a necessidade de construção de novas usinas, como também de novas linhas de transmissão.

Palavras-chave: Motor Stirling. Concentrador parabólico de calor. Energia solar. Fontes renováveis.

Abstract: Due to the constant increase of the world population, the need to construct new plants for electricity generation grows. The population increase together with the construction of new traditional plants generate environmental impacts. Therefore, there is a great increase in the interest for systems of generation of renewable energies. One of the cleanest known energy systems is solar energy, and the most traditional way to turn solar energy into electricity is through photovoltaic panels. However, this generation system still has a very low yield. For this reason, this work aims to present a system of solar energy generation that is not yet widespread. This uses a parabolic dish to concentrate the sun's heat on a Stirling engine, which in turn will power an electric generator. Among solar energy systems, this is the one that has the highest yield, and can easily reach 40%. The aim of this work is to significantly increase the reader's knowledge regarding this energy system, as well as to arouse their interest in implementing it, helping with this in the sustainability of the planet, reducing the need to build new plants as well as new transmission lines.

Keywords: Stirling engine. Parabolic heat concentrator. Solar energy. Renewable sources.

Introdução

O constante crescimento populacional no mundo, que conseqüentemente gera um crescimento industrial, também causa um aumento no consumo de energia. O crescimento ainda gera desmatamento e poluição, que afetam o planeta devido ao chamado “aquecimento global”, que interfere nas questões climáticas do mundo.

Assim, o clima está cada vez mais irregular, com chuvas mal distribuídas, fazendo com

¹ Acadêmico da FAVINCI, Timbó, SC, fredimarotto@gmail.com;

² leilson753@gmail.com.

³ Acadêmico da FAVINCI, Timbó, SC, roncada28@hotmail.com.

⁴ Acadêmico da FAVINCI, Timbó, SC, rodrigo.hprs@gmail.com.

⁵ Professora orientadora da FAVINCI, Timbó, SC, wolff1980@gmail.com.

que o sistema de geração de energia brasileiro, baseado em hidrelétricas, que até no momento era visto como um dos mais promissores devido ao seu ótimo custo/benefício, já é visto com outros olhos devido às condições ambientais que estão surgindo e se agravando.

Então, duas questões: a falta de chuva, que impede a geração de energia, e a construção de novas usinas hidrelétricas, que agravam ainda mais as situações climáticas pelas grandes inundações geradas.

Assim, investimentos em sistemas de geração de energia elétrica que causam pouco impacto ambiental começam a ter cada vez mais destaque. Segundo Lopez (2012, p. 21), “a energia solar é a fonte de energia menos poluente e menos finita conhecida até o momento”.

Podemos gerar energia elétrica solar de diversas maneiras. A mais comum é por placas fotovoltaicas, porém o seu rendimento ainda é muito baixo, em torno de 20%. Outra forma de transformar energia solar em elétrica é concentrando o calor do Sol através de um espelho parabólico para o funcionamento de um motor a vapor, mais conhecido como motor Stirling, transformando o calor do Sol em energia mecânica, e com esta, movimentar um pequeno gerador elétrico.

De acordo com Lopez (2012, p. 41), “a eficiência de conversão termelétrica da máquina Stirling é em torno de 40%”. Apesar de ter uma boa eficiência, determinado tipo de conversão ainda não está muito difundido.

O objetivo deste trabalho será justamente efetuar um estudo para reunir informações para o desenvolvimento de uma microusina solar, utilizando um concentrador parabólico de calor e um motor Stirling.

Para melhor compreensão deste trabalho, serão feitas, nos próximos tópicos, algumas definições importantes relacionadas ao sistema e, em seguida, serão abordados os tópicos relacionados aos objetivos deste trabalho. Para finalizar, serão analisados os resultados desta pesquisa, cruzando as informações com a realidade atual.

Estado da arte

Para melhorar a compreensão deste trabalho, serão feitas inicialmente várias definições a respeito de tal sistema de geração de energia, como também serão expostos alguns exemplos práticos semelhantes já implantados por outras entidades e, ainda, alguns dados técnicos relacionados aos equipamentos.

Geração distribuída

Atualmente, a energia elétrica consumida é produzida pelos grandes centros consumidores por médias e grandes usinas, geralmente localizadas longe dos centros de consumo. A ação provoca o uso de grandes linhas de transmissão para o transporte da energia até o seu local de consumo.

A geração distribuída nada mais é do que gerar essa energia perto dos centros de consumo, diminuindo a necessidade de construção de grandes usinas e linhas de transmissão, evitando assim mais impactos ambientais.

A geração distribuída é subdividida em microgeração distribuída e minigeração distribuída. De acordo com a **Superintendência de Comunicação e Relações Institucionais (SCR) (2017)**, a microgeração distribuída pode ser entendida como a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distri-

buição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Energia solar

A energia solar, como o próprio nome diz, é a energia fornecida pelo Sol, seja esta através de calor ou de luminosidade. Segundo Palz (1981, p. 36), “a energia solar recebida pela Terra a cada ano é 10 vezes maior do que os recursos fósseis totais, incluindo as reservas ainda não descobertas, inexploradas e não recuperáveis”.

Ainda de acordo com Palz (1981), a radiação solar gera diversos potenciais energéticos. Ventos surgem pela ascensão do ar quente proveniente do aquecimento dos oceanos. O aquecimento dos oceanos também resulta em precipitações nas regiões mais elevadas, gerando os potenciais hídricos. Entretanto, a forma mais conhecida de aproveitamento de energia solar é a energia proveniente de placas fotovoltaicas.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida com a conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (LOPEZ, 2012).

Outra forma é o aproveitamento do calor do Sol, captado através de coletores solares e então utilizado para aquecer fluidos diversos.

Coletores solares

Para captar e aproveitar o calor do sol, são utilizados equipamentos conhecidos como coletores solares. Coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor. Captam a radiação solar, convertem em calor, e transferem esse calor para um fluido (KALOGIROU, 2016).

Os coletores, de acordo com a sua forma construtiva e utilização, podem ser classificados em não concentradores e concentradores de calor.

Coletores não concentradores

Os coletores solares não concentradores, também chamados de estacionários, são equipamentos planos que têm a mesma área para interceptação e absorção da radiação solar. São comumente utilizados para aquecimento de água e podem gerar temperaturas em torno de 100°C. Não geram temperaturas suficientes para gerar energia elétrica.

Coletores concentradores

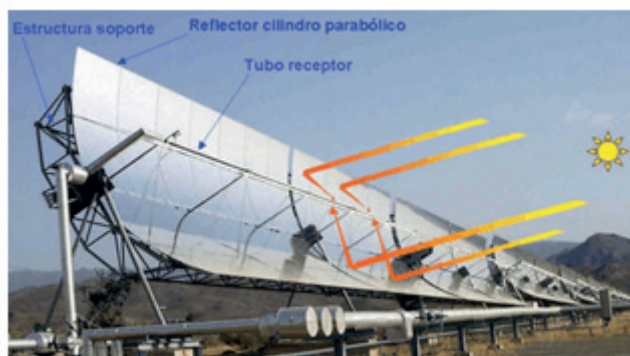
Os coletores concentradores de calor podem gerar temperaturas muito maiores do que os coletores estacionários, pois, como o próprio nome diz, concentram o calor em uma linha ou um único ponto. São classificados em diversos tipos: tipo calha, tipo torre, tipo prato.

Sistema tipo calha

O sistema concentra o calor do Sol de forma linear em um duto no qual circula o fluido que será aquecido. O fluido pode chegar a uma temperatura de 390°C. Depois de aquecido, pas-

sa por trocadores de calor e gera vapor para poder acionar turbinas de geração de eletricidade.

Figura 1. Concentrador tipo calha



Fonte: Disponível em <<https://www.pinterest.com.mx/pin/425027283565341253/>>. Acesso em: 29 out. 2017.

Sistema tipo torre

A energia solar é concentrada no alto de uma torre de forma pontual por uma grande quantidade de espelhos posicionados ao redor da base da torre. Da mesma maneira que o sistema tipo calha, determinado sistema aquece um fluido para gerar vapor e, com este, gerar energia elétrica. A temperatura do fluido pode chegar a 565°C.

Figura 2. Concentrador tipo torre



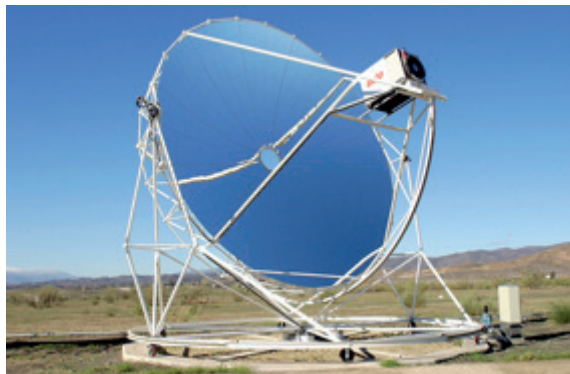
Fonte: Disponível em <<http://bustler.net/news/2340/ivanpah-solar-plant-towers-by-rafaa>>. Acesso em: 29 out. 2017.

Sistema tipo prato

Através de um prato parabólico revestido de espelhos, a energia solar é concentrada de forma pontual em um receptor que transfere o calor para uma máquina. De acordo com Lopez (2012, p. 57), “diversos ciclos termodinâmicos e fluidos de trabalho podem ser utilizados em sistemas tipo prato, tais como ciclo Rankine, usando água ou fluido orgânico, ciclos Brayton aberto e fechado e ciclo Stirling. Os mais disseminados são o Stirling e o Brayton ciclo aberto (turbina a gás)”.

Neste trabalho, será estudado apenas o ciclo Stirling. A temperatura no receptor deste sistema pode chegar a 750°C.

Figura 3. Concentrador tipo prato parabólico



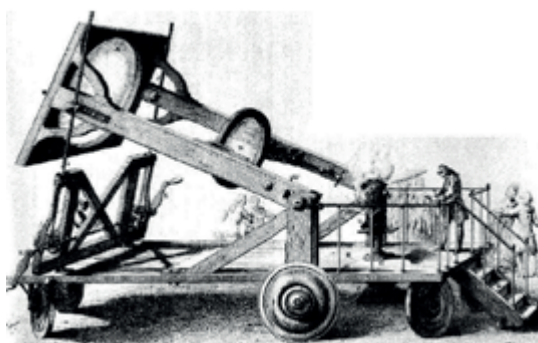
Fonte: Disponível em <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vista-disco-Eurodish.jpg>>. Acesso em 29 out. 2017.

História dos coletores solares

Os primeiros experimentos visando à utilização da energia solar são atribuídos a Arquimedes, no ano de 212 a.C., que, utilizando lentes convergentes, concentrou o calor solar em um ponto para acender fogueiras.

Na Europa e Oriente Médio (século XVIII), foram desenvolvidas fornalhas solares para fundição de ferro, cobre e outros metais. De acordo com Kalogirou (2016), uma das primeiras aplicações em larga escala foi a fornalha solar desenvolvida por Lavoisier em 1774. A fornalha possuía uma lente de 1,32m e outra secundária de 0,2m e foi capaz de atingir temperaturas de 1.750°C.

Figura 4. Fornalha solar de Lavoisier (1774)



Fonte: Kalogirou (2016).

Segundo Palz (1981, p. 193), um dispositivo de concentração com refletor na forma de uma seção cônica, e com foco linear (não paraboloide), foi inventado na França por Mouchot, que exibiu o engenho na Exposição de Paris de 1878. “O vapor produzido no foco foi usado para operar uma prensa tipográfica. Um ano depois, o mesmo inventor usou um aparelho similar na Argélia, para bombear água em uma altura de 1 m a vazão de 1 m³ por hora”.

Figura 5. Bomba de água de Mouchot



Fonte: Palz (1981).

Segundo Jordan e Ibele (1956) apud Kalogirou (2016), nos Estados Unidos, o engenheiro americano John Ericsson desenvolveu vários sistemas com concentradores cilíndricos parabólicos e motores a vapor movidos diretamente com energia solar.

Já em 1901, A. G. Eneas construiu um sistema de bombeamento de água em uma fazenda na Califórnia. Segundo Kreith e Kreider (1978) apud Kalogirou (2016), o sistema consistiu em um prato parabólico formado por 1.788 espelhos, que concentravam os raios solares em um ponto focal, e havia uma caldeira. A caldeira aquecia água, produzindo vapor, que movia uma bomba centrífuga. De acordo com Palz (1981, p. 194):

Um sistema razoavelmente grande deste tipo (100HP) foi instalado por Shuman no Egito, em 1913, para irrigação. Foi a maior instalação solar construída até 1980. A segunda maior foi erigida em 1976 no Novo México (25 HP). Deve-se também mencionar um motor a vapor de 4HP desenvolvido pelo inglês A.G. Eneas, por volta de 1904, nos EUA, que também usava uma seção cônica como refletor. As experiências primitivas foram interrompidas por causa da tendência geral para uso de subprodutos de petróleo.

Ciclo Stirling

O ciclo Stirling é um sistema de altas temperaturas e pressões. O fluido utilizado normalmente é o gás hidrogênio ou hélio, ou até mesmo o ar atmosférico em sistemas de pequenas dimensões. O fluido de trabalho é aquecido e esfriado de forma alternada por processos de temperatura e volume constantes. O motor Stirling normalmente possui um regenerador de alta eficiência para absorver o calor do gás durante a etapa do esfriamento e troca de calor durante o seu aquecimento.

“A criação desse motor foi feita pelo escocês Robert Stirling, em 1816, com o intuito de simplificar a máquina a vapor e também oferecer uma alternativa mais segura à operação das

caldeiras” (LOPEZ, 2012, p. 58).

O motor Stirling não foi empregado em larga escala devido a problemas de transferência de calor, e não existiam, na época, ligas metálicas que resistissem às temperaturas aplicadas. A alta do petróleo e do carvão como fontes de energia também foi decisiva no seu desuso.

Segundo Lopes (2012), o interesse pelos motores Stirling voltou nos anos 1960 a 1970, devido a questões ambientais envolvendo combustíveis fósseis. Pequenos projetos mais sofisticados foram implementados na década de 80.

Os motores de Stirling funcionam através da expansão de um gás aquecido por uma fonte de calor externa, seguindo-se de uma contração desse mesmo gás quando resfriado. O motor contém, internamente, uma fonte térmica para a carcaça fria e vice-versa, composto também por dois pistões, dos quais um é o “pistão de deslocamento”, que tem como único objetivo transferir o gás da parte fria para a parte quente enquanto outro pistão, chamado de “pistão de força”, realiza trabalho e altera o volume interno da parte quente na medida em que o gás se expande ou contrai (CONTAR, 2008, p. 13).

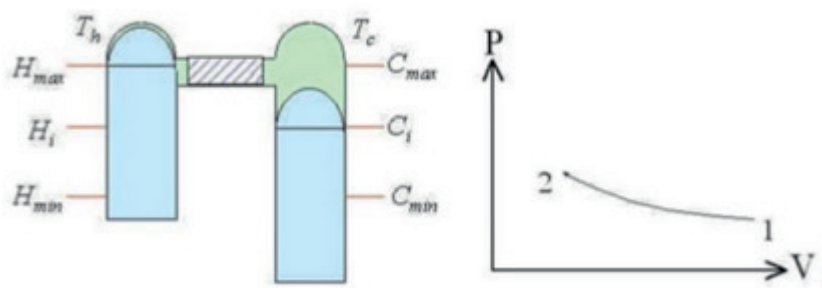
O funcionamento do motor é composto de quatro etapas internamente reversíveis em dois tempos:

- Compressão isotérmica (temperatura constante).
- Aquecimento isocórico (volume constante).
- Expansão isotérmica (temperatura constante).
- Resfriamento isocórico (volume constante).

Compressão isotérmica (ciclo 1-2)

O êmbolo frio (T_c) se move da posição C_{\min} para a posição C_i devido à inércia provocada pelo movimento do volante do motor, comprimindo o fluido de trabalho. A compressão gera aquecimento do fluido, que então é removido pelo regenerador, caracterizando a curva no diagrama PV.

Figura 6. Compressão isotérmica

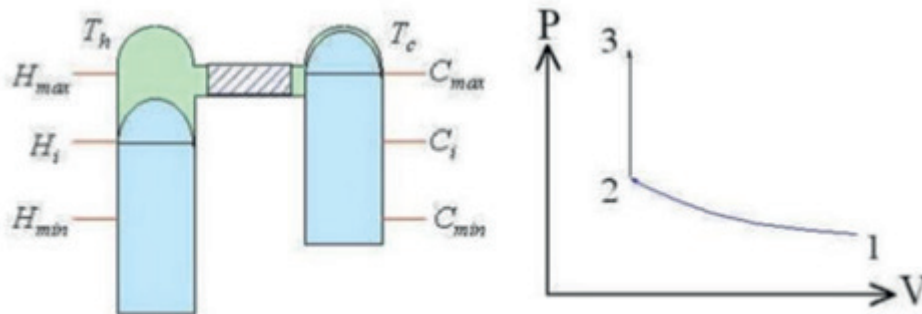


Fonte: Disponível em <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC294.pdf>> Acesso em: 5 nov. 2017.

Aquecimento isocórico (ciclo 2-3)

O êmbolo frio continua se movendo até a posição C_{\max} , enquanto o êmbolo quente (T_h) se move da posição H_{\max} até a posição H_i , fazendo o fluido contido no sistema passar pelo regenerador. O fluido, anteriormente frio, passa pelo regenerador (que ainda possui calor proveniente do ciclo 4 – 1 e 1 – 2), devolvendo calor para o fluido e aumentando a pressão do sistema devido ao volume constante.

Figura 7. Aquecimento isocórico

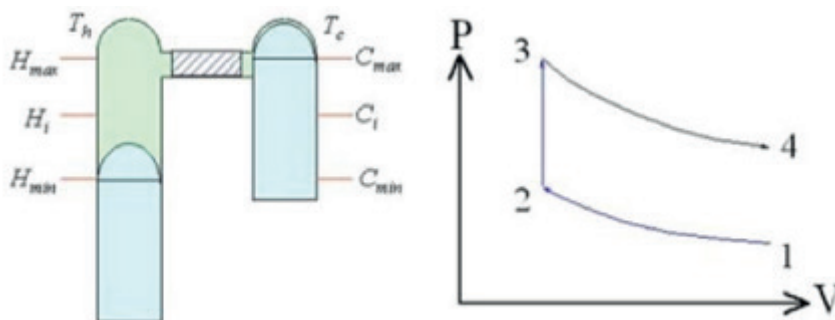


Fonte: Disponível em <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC294.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Expansão isotérmica (3 – 4)

O fluido é aquecido pela fonte de calor externa, causando a expansão do fluido e movendo o êmbolo da câmara quente (T_h) da posição H_i até a posição H_{\min} .

Figura 8. Expansão isotérmica

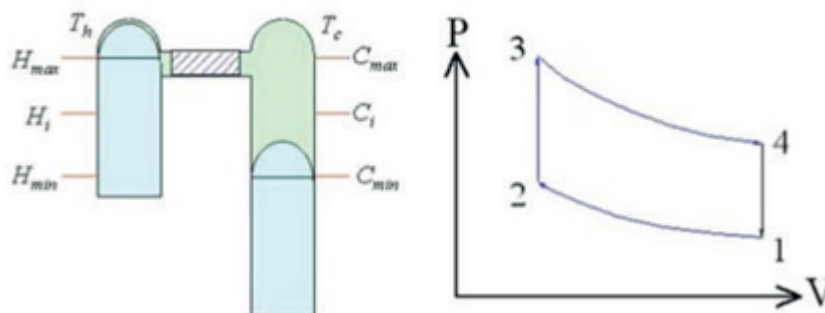


Fonte: Disponível em <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC294.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Resfriamento isocórico (4 – 1)

Nesta etapa, o êmbolo da câmara quente (T_h) retorna à posição H_{\max} , o êmbolo frio (T_c) ao mesmo tempo retorna à posição C_{\min} , fazendo o fluido passar pelo regenerador que absorve seu calor, armazenando para o próximo ciclo 2 – 3.

Figura 9. Resfriamento isocórico



Fonte: Disponível em <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC294.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

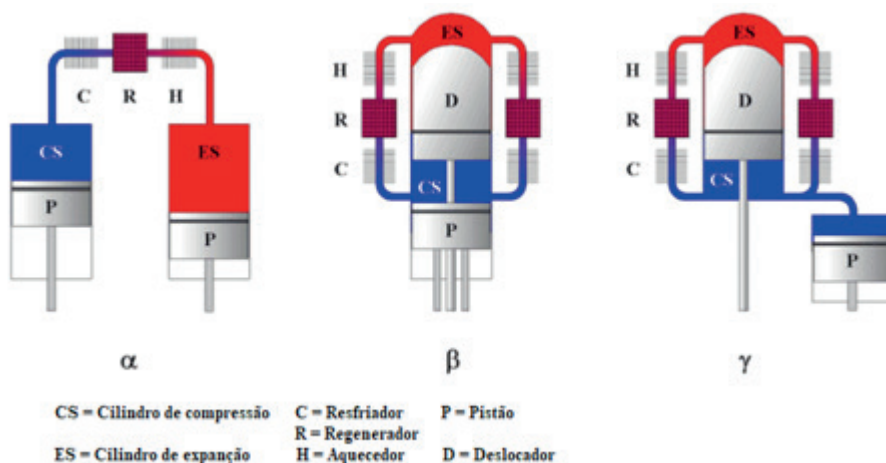
Tipos de motores Stirling

Os motores Stirling, de acordo com a sua forma construtiva, são denominados de alfa, beta e gama. Segundo Lopez (2012, p. 59):

Na estrutura alfa, o motor possui dois pistões que são conectados em série pelo trocador de calor de aquecimento, regenerador e trocador de calor de resfriamento. A concepção dos tipos beta e gama usa um pistão de deslocamento e um de força arranjados em um mesmo eixo.

Na próxima figura, podem ser visualizados os três tipos de motores.

Figura 10. Motores Stirling tipo Alfa, Beta e Gama



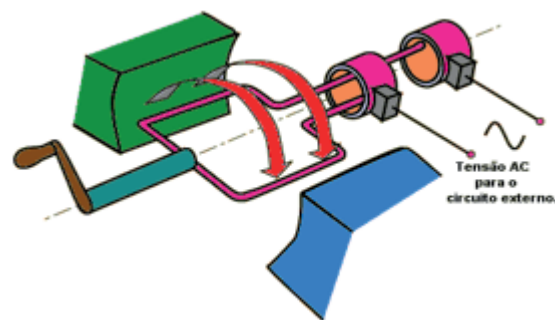
Fonte: Disponível em <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC294.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Gerador de energia elétrica

O gerador de energia elétrica é um equipamento que tem a finalidade de converter energia mecânica em energia elétrica, podendo esta ser alternada ou contínua. O gerador de corrente contínua é conhecido como dínamo e o gerador de corrente alternada como alternador. Os alternadores são os utilizados para a geração da energia da rede elétrica que chega em nossas casas. Os dínamos são geralmente utilizados em pequenas instalações.

O estator é substituído por dois ímãs permanentes. O induzido é instalado entre os dois ímãs. Quando este é induzido, recebe movimento de rotação por uma fonte externa, na qual é induzida, em seus terminais, uma força eletromotriz (tensão AC).

Figura 11. Gerador elementar



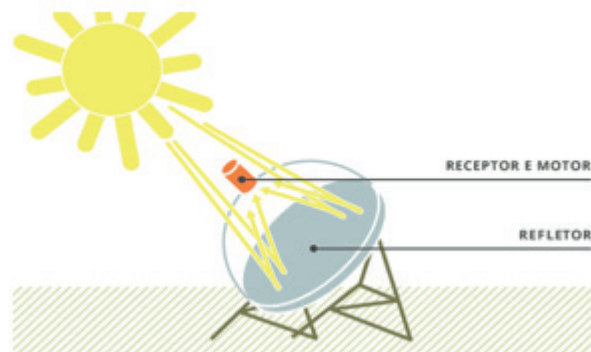
Fonte: Disponível em <<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=3332>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Rastreador solar do concentrador de calor

De acordo com Oliveira Junior (2015), o rastreador solar (Tracker) é o mecanismo eletromecânico responsável por posicionar um objeto de forma que a incidência dos raios solares permaneça perpendicular na superfície desejada.

Para que o concentrador de calor tipo prato parabólico funcione corretamente, e com um bom rendimento, este deverá estar permanentemente direcionado para o Sol, pois os concentradores são projetados para que todos os raios solares que incidem paralelamente ao seu eixo sejam direcionados ao ponto focal do prato, ou seja, ao absorvedor.

Figura 12. Desenho de um concentrador de disco parabólico

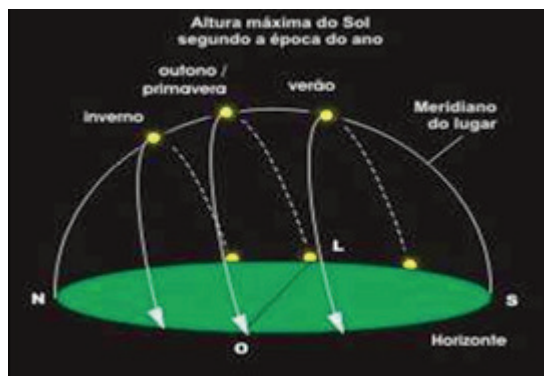


Fonte: Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-heliotermica-entenda-como-funciona.html>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

O Sol se movimenta de leste a oeste durante o dia e entre norte e sul durante o ano, seguindo as estações inverno e verão. Sendo assim, o concentrador tipo prato necessita de um sistema de rastreamento solar para se manter sempre alinhado com o Sol.

É confirmado por Kalogirou (2016), que menciona que a tecnologia do sistema tipo prato parabólico tem alta eficiência na concentração de calor por rastrear o Sol em dois eixos, mantendo-se alinhado com o Sol durante o dia inteiro, e também durante as estações do ano.

Figura 13. Movimentação do Sol durante o ano



Fonte: Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/Sites-HF/Paula/sun1.html>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Existem muitos trabalhos relacionados ao desenvolvimento e à construção de rastreadores solares, como sistemas passivos simples e ativos com microprocessadores de grande complexidade.

Rastreadores passivos

Segundo Oliveira Junior (2015), os rastreadores passivos possuem a vantagem da não utilização da energia elétrica para a movimentação do sistema. Baseiam-se em dois fenômenos físicos para a deslocação do equipamento: a memória de forma e o efeito da expansão térmica.

Os sistemas normalmente utilizam a propriedade de dilatação de diferentes ligas metálicas ou fluidos que, ao serem aquecidos pelo calor do Sol, direcionam o concentrador solar na direção do Sol.

Rastreadores ativos

Determinados sistemas podem ser de rastreamento microprocessado ou de sensoriamento eletro-óptico, conforme o princípio que rege a sua movimentação.

Os sistemas microprocessados se baseiam em um algoritmo predeterminado que movimenta o sistema a passos predefinidos durante o dia, sem a interferência da luz do Sol.

Os sistemas com sensoriamento eletro-óptico se baseiam em informações instantâneas de luminosidade. Este possui pelo menos dois sensores fotossensíveis através da diferença de sinal entre os sensores. Um microcontrolador processa os sinais e aciona motores que mantêm o concentrador alinhado com o Sol.

Exemplos de sistemas semelhantes

Neste tópico, serão expostos vários sistemas semelhantes já aplicados em outros estudos ou por outras entidades. O propósito é dar credibilidade ao trabalho e mostrar que já existem testes práticos comprovando o alto rendimento do sistema.

Segundo a Inovação Tecnológica (2008), engenheiros do laboratório Sandia, nos Estados Unidos, estabeleceram um novo recorde mundial na eficiência da conversão de energia solar para eletricidade fornecida diretamente à rede de distribuição. A eficiência alcançou 31,25%.

O recorde anterior havia sido estabelecido em 1984, e era de 29,4%. Os seis novos geradores, desenvolvidos em parceria com a empresa Stirling Energy, quando em operação, deverão gerar 150 kW.

Figura 14. Gerador prato parabólico de 25kW do Laboratório Sandia



Fonte: Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=batido-recorde-mundial-de-eficiencia-na-conversao-energia-solar-eletricidade#.WgfFwLpFztQ>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

No Arizona-USA foi instalada a primeira usina comercial do mundo, que usa tecnologia Stirling de concentração de energia solar em discos parabólicos. São 60 coletores parabólicos solares, chamados de SunCatcher, com 25 kilowatts cada um, totalizando 1,5 megawatts.

Figura 15. Gerador prato parabólico de 25kW no Arizona – EUA



Fonte: Disponível em <<http://www.ecoharmonia.com/2010/09/inaugurada-usina-solar-stirling-de.html>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

A Renovalia Energy instalou os primeiros discos Stirling em Albacete. A capacidade inicial da planta, localizada em Villarobledo (Albacete), é de 1 MW, embora o objetivo da Renovalia seja atingir 71 MW.

Figura 16. Discos Stirling em Albacete



Fonte: Disponível em <<http://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/primera-planta-comercial-en-espana-con-tecnologia-de-discos-stirling>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Plataforma Solar de Almería: O sistema DISTAL I entrou em operação em 1992, com três unidades de disco parabólicas de 7,5 metros de diâmetro, com um motor Stirling SOLO V160 capaz de gerar até 9 kW, localizado em sua área focal.

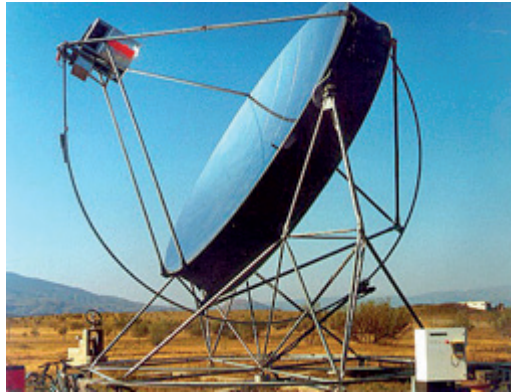
Figura 17. Sistema DISTAL I em operação na Plataforma Solar de Almería



Fonte: Disponível em <<http://www.psa.es/es/instalaciones/discos/distal1.php>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Entre os anos 1996 e 1997, foram instalados três novos discos chamados de DISTAL II. O novo protótipo tem um diâmetro um pouco maior, de 8,5 metros. O motor Stirling também melhorou, sendo agora o modelo SOLO V161, de 10 kW.

Figura 18. Sistema DISTAL I em operação na Plataforma Solar de Almería



Fonte: Disponível em <<http://www.psa.es/es/instalaciones/discos/distal2.php>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

O EuroDish é um novo projeto de Prato/Stirling de 10 kW, para geração de energia descentralizada, desenvolvido por um consórcio alemão-espanhol entre 1998 e 2001. Atualmente, o projeto EnviroDish está em andamento com o objetivo de preparar a introdução no mercado do sistema Euro Dish.

Figura 19. Sistema EuroDish em operação na Plataforma Solar de Almería



Fonte: Disponível em <<http://www.psa.es/en/instalaciones/discos/eurodish.php>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Justificativa

Optou-se realizar esta pesquisa pelo fato do sistema de geração de energia elétrica por concentrador parabólico de calor e motor Stirling ser um dos sistemas de geração de energia mais limpos já conhecidos até o momento. Outros fatores que influenciaram são os benefícios que os sistemas de geração distribuída trazem para o sistema elétrico.

De acordo com a **Superintendência de Comunicação e Relações Institucionais (SCR) (2017)**, os estímulos à geração distribuída são justificados pelos potenciais que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Dentre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética.

Como o sistema é um dos mais limpos e também possui um rendimento superior, deve

receber mais atenção e, desta maneira, com o trabalho concluído, o sistema poderá ser difundido com mais facilidade para a sociedade em geral.

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica sobre os itens pertencentes ao assunto em apostilas, livros, sites da área, artigos, monografias e dissertações para podermos obter informações relevantes ao tema. Inicialmente, foi levantado o referencial teórico para melhor entendimento do assunto. Logo em seguida, foi feito um estudo de como construir um sistema caseiro, a fim de gerar energia elétrica em pequena escala.

O projeto

Para confeccionar um sistema prato Stirling caseiro, podemos iniciar construindo o concentrador de calor. Iniciar a construção deste do zero é bastante complexo, pois deve possuir a curvatura parabólica. Sendo assim, facilmente pode ser confeccionado ao inserirmos pequenos espelhos ou um filme espelhado em uma antena parabólica de televisão ou telecomunicação convencional.

No link a seguir, pode ser visualizado um tutorial de construção de um concentrador de calor parabólico utilizando uma antena 90 cm Banda ku. Como material refletivo, foi utilizado filme espelhado. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Q90i31JIQ3M>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

Figura 20. Construção de um concentrador parabólico



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Q90i31JIQ3M>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

O prato também pode ser recoberto por pequenas pastilhas espelhadas, como foi feito no protótipo da próxima figura.

Figura 21. Protótipo com antena parabólica revestida de pequenos espelhos



Fonte: Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=bwazXoqULKA>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

O motor normalmente utilizado é o motor Stirling. Conforme Paz (1981), um outro gerador desenvolvido, em especial no âmbito dos programas espaciais, é o motor Stirling. Reaparece para as aplicações em energia solar, pois necessita de pouquíssima manutenção.

A confecção do motor é um pouco mais complexa e exige conhecimentos na área mecânica. Leandro Wagner, autor do Blog Manual do motor Stirling, em 2013, publicou um tutorial de construção de um motor Stirling utilizando materiais recicláveis. Disponível em: <<http://manualdomotorstirling.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

Figura 22. Protótipo de um motor caseiro



Fonte: Disponível em: <<http://manualdomotorstirling.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

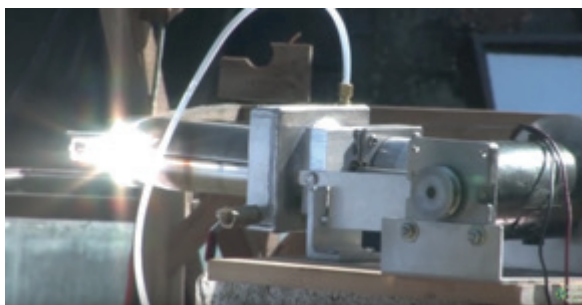
Conseguimos acionar um pequeno motor e gerar uma potência elétrica de 290 mW. Para gerar energia e injetar na rede ou acionar lâmpadas ou eletrodomésticos, é preciso de um motor maior. Nas próximas figuras podem ser visualizados vários protótipos maiores, com seus respectivos links para acesso.

Figura 23. Protótipo de dois motores Stirling caseiros



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8dDwdVgAkXk>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 24. Protótipo de um motor Stirling caseiro



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=4AsnE9kwyDw>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 25. Protótipo de um motor Stirling caseiro



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kr-sL0AKKFQ>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 26. Protótipo de um motor Stirling caseiro



Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=O2Hw_Ahm104>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Na próxima figura pode ser visualizado um motor de maior porte acionando um alternador automotivo. Este gera 300 Watts de potência.

Figura 27. Protótipo de um motor Stirling caseiro



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=OOVbsIFyJD8>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Na figura 28 pode ser visualizado um protótipo completo em funcionamento.

Figura 28. Protótipo de um motor Stirling caseiro



Fonte: Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dFGvRSGn7Y8>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Falta ainda o sistema de rastreamento solar. Segundo Oliveira Junior (2015), o rastreador deve ser necessariamente de dois eixos, permitindo movimentos tridimensionais.

Com o avanço da eletrônica, consegue-se melhor precisão e controle do posicionamento do sistema, ou seja, utilizando um sistema de rastreamento ativo. Portanto, uma boa opção é utilizar sensores LDR para verificar a posição do Sol e fazer o controle por meio da plataforma Arduino, como fez Oliveira Junior (2015), no projeto que desenvolveu para direcionar um coletor disco parabólico para aquecer óleo térmico.

Figura 29. Concentrador solar com rastreador tridimensional



Fonte: Oliveira Junior (2015).

Como gerador elétrico, as opções utilizadas são pequenos motores de corrente contínua com tensão e corrente de acordo com cada projeto. Para projetos um pouco maiores, há a opção de utilização de alternadores automotivos. Estes normalmente estão disponíveis em tensões de 12 e 24 volts. Nas próximas figuras podem ser visualizados alguns modelos de motores de corrente contínua e alternadores.

Figura 30. Motor elétrico de corrente contínua/síncrono/6V/24V/5.33 a 1178.85 W



Fonte: Disponível em <<http://www.directindustry.com/pt/prod/johnson-electric/product-665-470224.html>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 31. Motor elétrico de corrente contínua/síncrono/18V/micro/720,9 W



Fonte: Disponível em <http://www.directindustry.com/pt/prod/johnson-electric/product-665-470224.html#product-item_282301>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 32. Alternador fusca/brasil/kombi 55 A Bosch



Fonte: Disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-779739781-alternador-fusca-brasil-kombi-55a-bosch-cinta-e-suporte_JM>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Figura 33. Alternador Mercedes Benz Caminhão 12v 55 Amp



Fonte: Disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-853780155-alternador-mercedes-benz-caminhao-12v-55-amp-_JM>. Acesso em: 5 nov. 2017.

Resultados e discussão

Após ampla pesquisa, chegamos ao final deste trabalho com mais um vasto aprendizado na área de energia solar. A energia solar concentrada, ainda pouco disseminada, oferece bastante interesse a quem se envolve no assunto, pois é uma energia limpa e bastante abundante no planeta. Com o término desta pesquisa, observamos que existem poucos trabalhos relacionados a motores Stirling montados em pratos parabólicos para geração de energia elétrica, sendo uma área que pode ser muito mais explorada.

É fácil construir um concentrador tipo prato parabólico, fazer este se movimentar e se alinhar com o Sol e definir um gerador elétrico para acoplar ao motor Stirling. Entretanto, construir o motor Stirling em si exige conhecimentos mais aprofundados em mecânica. Assim, é necessária uma parceria entre as engenharias elétrica e mecânica, para que juntas realizem um bom projeto.

Considerações finais

Formas de energia renováveis estão cada vez mais presentes na matriz energética brasileira devido às questões ambientais e climáticas. A micro e a minigeração distribuídas são formas inteligentes de expansão do setor elétrico. Com estas, gera-se energia no mesmo local onde a energia é consumida, diminuindo a necessidade de construção de novas usinas de grande porte, como também linhas de transmissão.

Como já visto no desenvolvimento deste trabalho, a energia solar é uma das energias mais limpas conhecidas até o momento e a maneira mais eficiente é concentrar determinada energia através do sistema prato Stirling. A principal vantagem em utilizar um motor Stirling é a sua capacidade de realizar trabalho sem emitir poluentes, e também por ser um motor muito silencioso. A sua principal desvantagem é o seu alto custo de fabricação, que pode ser amenizado com a sua entrada no mercado e com sua produção em série.

A energia solar também é dez vezes maior, a cada ano, do que todas as energias fósseis existentes no planeta, porém a energia solar ainda é tão pouco utilizada. Assim, conclui-se que este trabalho é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável do planeta. A realização desta pesquisa agregou muitos conhecimentos e possibilitará também que outras pessoas da sociedade os tenham.

Esta é uma área que deve ser compreendida e aplicada pelas empresas e engenheiros relacionados ao tema, para que essa forma de gerar energia venha a ser, um dia, a principal fonte de energia utilizada no mundo.

Projetos futuros

Para projetos futuros, existe uma infinidade de temas que poderiam ser estudados e/ou implementados, pois são pouco difundidos na sociedade e necessitam de estudos diversos. Recomendamos fazer estudos aprofundados sobre o motor Stirling e projetos de construção desses motores para aplicação em pratos Stirling. Recomendamos também projetar pequenas usinas desse sistema para sua melhor compreensão.

Referências

CONTAR, Ives Barbosa. **Desenvolvimento de um motor de Stirling acoplado a uma placa parabólica coletora de energia solar**. 2008. 38f. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) - Universidade São Francisco. Campinas. São Paulo, 2008. Disponível em <<http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1512.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2017.

GALDINO, Jean Carlos da Silva. **Eletrotécnica II**. Apostila - Curso: Manutenção de ferrovia – Disciplina: Grupo Motor Gerador. Instituto Federal do Rio Grande do Norte. 2011. Disponível em <http://www3.ifrn.edu.br/~jeangaldino/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=apostila_grupo_motor_gerador1.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2017.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Batido recorde mundial de eficiência na conversão energia solar eletricidade**. 2008. Disponível em <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=batido-recorde-mundial-de-eficiencia-na-conversao-energia-solar-eletricidade#.WgTuHrpFztR>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia solar para produção de eletricidade**. São Paulo: Artliber, 2012.

MALAGUETA, Diego C. **Histórico da energia solar**. 2012. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_heliotermica>. Acesso em: 29 out. 2017.

OLIVEIRA JUNIOR, Gilberto Bueno. **Construção e avaliação térmica de um sistema concentrador parabólico com seguidor solar**. Gilberto Bueno de Oliveira Junior, 2015. 111 f. Orientador: Alcides Padilha. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/133981/oliveirajunior_gb_me_bauru.pdf?sequence=3>. Acesso em: 29 out. 2017.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. 2. ed. São Paulo: Editora Hemus, 1981.

SCR (Superintendência de Comunicação e Relações Institucionais). **Geração Distribuída**. 2017. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/Ce-gkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false>. Acesso em: 29 out. 2017.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2012.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

AVALIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PARA MÓDULOS DE LED

Rating the printed circuit board for LED modules

Jean Carlos Strutz¹

Resumo: O presente trabalho mostrará um estudo realizado em módulos de LED, aplicados na iluminação em geral. Este estudo apresentará os tipos de material das placas de circuito impresso e a metodologia para avaliar o desempenho dos módulos de LED, levando em consideração o custo para produção e quais dos materiais apresentaram melhores desempenhos fotométricos. Serão apresentadas as características mecânicas das placas de circuito impresso utilizadas, bem como as características elétricas da configuração de ligação dos LED. Na sequência, apresentaremos as metodologias utilizadas para a realização das medições fotométricas dos módulos de LED, bem como os equipamentos utilizados para tais medições. Ao final, são apresentados os resultados da análise entre material de base, desempenho fotométrico e custo x benefício por meio dos resultados das medições fotométricas, da depreciação luminosa e do custo de fabricação dos modelos.

Palavras-chave: Módulos LED. Depreciação. Material base. Tipos de PCIs.

Abstract: The current work will show a study over LED modules applied in general lighting. This study will present the types of printed circuit boards and the methodology to evaluate the performance of the LED modules, taking into consideration the production cost and the one that will present the best photometric performance. The mechanical characteristics of the used printed circuit boards will be presented, as well as the electrical characteristics of the LED connections setup. In sequence, it will be presented the methodology that was adopted to perform the photometric measurement of the LED modules, as well as the equipments that were adopted to do such measurements. At the end, the results of the analysis are presented between base material, photometric performance and cost vs. benefit through results of photometric results, luminous depreciation and the models manufacturing cost.

Keywords: LED modules. LED depreciation. PCB types.

Introdução

Com o avanço da tecnologia LED, este é um período em que a utilização dessa tecnologia está em ascensão nas áreas de iluminação. Conforme Freitas (2015), houve um aumento de quatro milhões de unidades em 2011 para 25 milhões em 2014, seja residencial, industrial ou público. Outro indicador do avanço são as publicações da portaria de número 389, de 25 de agosto de 2014, e portaria de número 144, de 13 de março de 2015.

Para o mercado consumidor nacional, existem dois fatores que caminham lado a lado: qualidade e custo. A qualidade é um fator, cujos requisitos mínimos são apontados pelas portarias de nº 389 e nº 144, mencionadas anteriormente. O fator custo tem uma relação inversamente proporcional ao fator qualidade. Produtos para iluminação com tecnologia LED têm essa relação extremamente estreita, e as portarias publicadas resolveram um problema. Conforme Freitas (2015), o mercado percebeu a necessidade de regularizar os produtos considerados o “presente e o futuro da iluminação”, visto que o número de materiais sem qualidade e que não respeitam as normas técnicas vigentes é alarmante.

Diante das observações, constata-se que o desenvolvimento de produtos, utilizando tecnologia LED, deve atender às exigências de qualidade regulamentadas, bem como as exigências do mercado consumidor. Assim, o uso de material para fabricar módulos de LED traz ao estudo produtos de qualidade a um custo reduzido. Daremos início com a avaliação dos materiais que

¹ Mestre em Engenharia Elétrica – jeanstrutz@gmail.com

são base das placas de circuito impresso, utilizados nos módulos de LED.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos após a análise de placas de circuito impresso, utilizadas como estrutura para fabricação de módulos de LED. A análise será feita por meio da monitoração da temperatura, do fluxo luminoso e da depreciação luminosa. Ao final, será apresentada a relação custo x benefício entre os materiais.

O trabalho aqui descrito iniciará com a apresentação das características elétricas dos módulos de LED e, após, as características mecânicas. Na sequência, é apresentado o modelo do LED utilizado no módulo, bem como a apresentação dos equipamentos de medição utilizados, detalhando as características da esfera integradora, do multiphotometro PHOTO 2000J e da fonte de tensão WY305, ambos do fabricante Everfine.

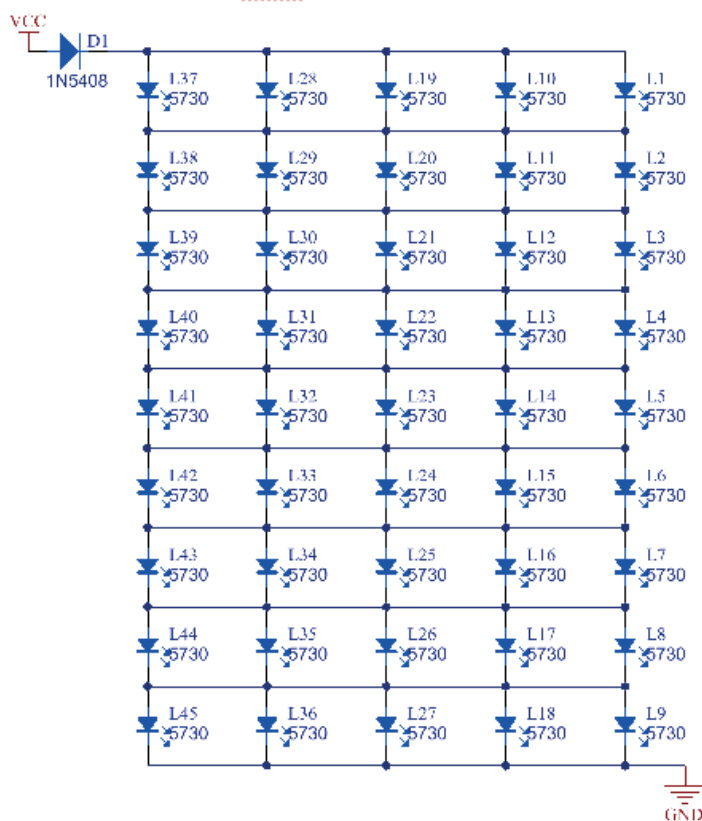
Por fim, tem-se a apresentação dos módulos ensaiados por 4.300 horas, contemplando com o histórico da depreciação luminosa dos módulos e a relação custo x benefício para cada tipo de módulo ensaiado.

Placas de circuito impresso: módulos de LED – características elétricas

O módulo de LED é composto pela placa de circuito impresso e pelos componentes eletrônicos. É composto por 47 LEDs em um arranjo série/paralelo, conforme apresentado na Figura 1, e um diodo para proteção contra ligação invertida de alimentação.

A opção da configuração de ligação dos LEDs, com nove LEDs conectados em série, e cada série desta em paralelo com mais quatro séries, é motivada por serem encontradas, no mercado, inúmeras fontes com esses níveis de tensão e corrente, sendo: Corrente de saída: 750mA e Tensão de saída: $\approx 28V_{cc}$.

Figura 1. Arranjo de LEDs

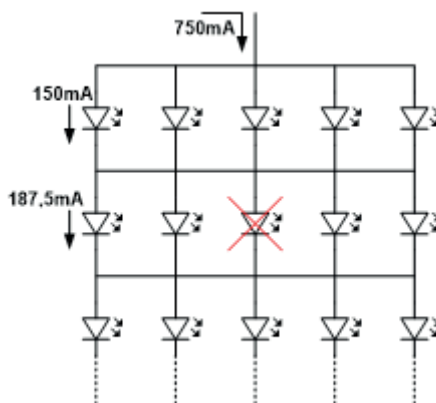


Fonte: O autor (2016).

Neste arranjo de ligação, em cada intervalo de ligação em série faz-se a interligação de todos os anodos, dadas algumas características, que são elas:

Caso houver a falha de um LED, a série não se apagará por completo, sendo alimentado pela corrente proveniente dos LEDs em paralelo ao falhado, conforme representado pela Figura 2.

Figura 2. Falha de um LED no módulo



Fonte: O autor (2016).

- O terminal de dissipação de calor do LED, denominado *slug*, que é conectado ao anodo, terá uma área de dissipação maior. Caso contrário, no layout da PCI deveria ser providenciada uma pequena área de isolamento entre cada LED.
- Homogeneidade na queda de tensão em cada LED.
- Maior facilidade para o desenvolvimento e menor susceptibilidade a defeitos na fabricação da PCI.

Os LEDs utilizados são do fabricante Honglitrionic, com *Part Number*, HL-A-5730D42W-S1-HR1. O componente pode ser visto na Figura 3.

Figura 3. LED 5730 da Honglitrionic



Fonte: Disponível em: <<http://en.honglitrionic.com/en>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

No Quadro 1 são apresentadas as principais características elétricas e fotométricas do componente.

Quadro 1. Características elétricas do LED 5730

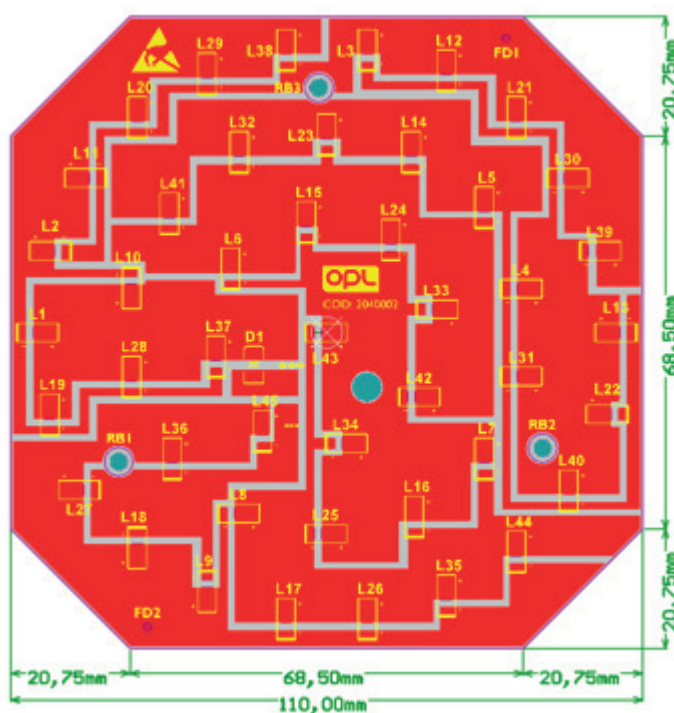
Parâmetros	Valor	Unidade
Tensão Direta [Vf]	3,2	Vcc
Potência Dissipada [Pd]	500	mW
Corrente Direta [If]	150	mA
Max. Corrente Direta. [Ifm]	200	mA
Tipo de lente	Amarelo difuso	
Intensidade luminosa (Iv)	17,3	cd
Fluxo luminoso (Φ)	53	lm
Ângulo de abertura	120	graus

Fonte: Disponível em: <www.everfine.net>. Acesso em: 19 jul. 2018.

Módulos de LED – Características mecânicas

Para apresentação das características mecânicas, é apresentada, na Figura 4, uma imagem do layout do módulo de LED, confeccionado no formato hexagonal, nas dimensões de 110mm X 110mm.

Figura 4. Módulo de LED

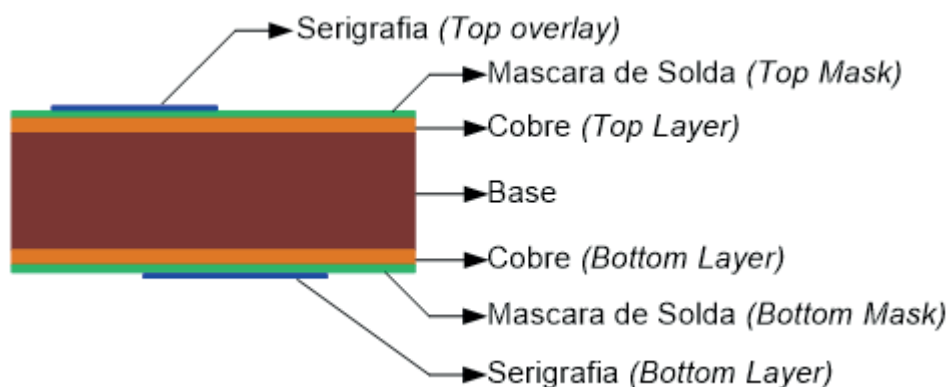


Fonte: O autor (2016).

As áreas em vermelho indicam a área de cobre, que é conectada ao terminal *slug* de dissipação do LED, assim como também fazem a interligação entre os componentes. Os pontos circulares em cinza são furações para fixação e passagem dos fios de alimentação. As partes tracejadas em claro representam a isolamento entre as áreas de cobre.

Quanto à construção da PCI, temos, na Figura 5, um desenho que representa um corte transversal de uma placa de circuito impresso de dupla face.

Figura 5. Corte transversal de uma PCI



Fonte: O autor (2016).

- Serigrafia: camada utilizada para informações pertinentes ao circuito eletrônico, como informações adicionais do circuito e indicações dos componentes R1, C4, U2 etc.
- Máscara de solda: camada de tinta aplicada para proteção contra oxidação da área de cobre da PCI. Deixa em evidência somente as partes de cobre, utilizadas como ponto de solda.
- Cobre: camada de cobre, com espessura predeterminedada pelo projetista, obedecendo apenas as limitações do fabricante. Sua principal função é a de ser responsável pela ligação dos terminais dos componentes.
- Base: material que serve como base de apoio e sustentação das placas de circuito impresso.

Modelos de PCIs utilizados

As características das PCIs, utilizadas para análise de melhor desempenho deste artigo, são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Diferença entre os módulos

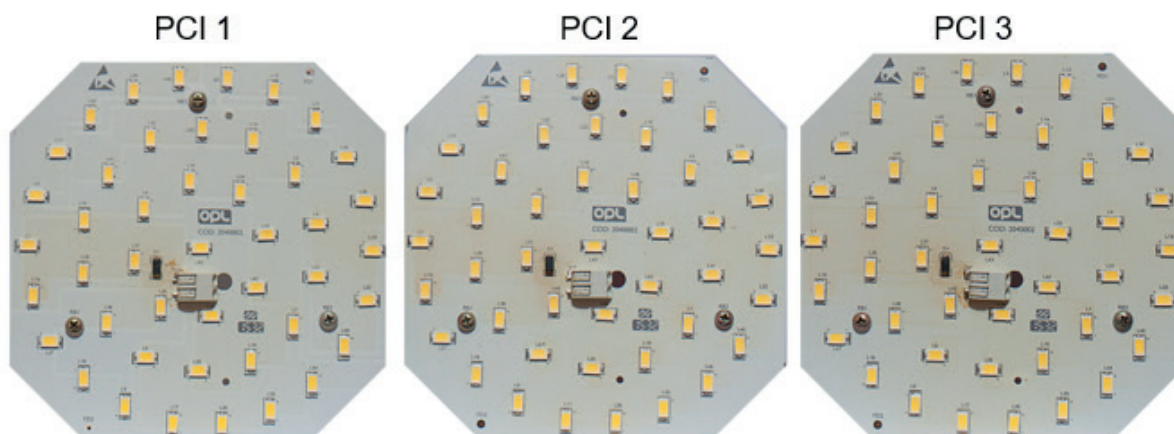
	PCI 1	PCI 2	PCI 3
Tipo de base	Composite	Fibra de vidro	Fibra de vidro
Espessura da base [mm]	1,6	1,6	0,8
Dupla face	Não	Sim	Sim

Fonte: O autor (2016).

Para os modelos de PCI com dupla face, o lado oposto aos componentes é coberto totalmente por cobre, representando uma malha de cobre, porém sem ligação elétrica e sem máscara de solda. A técnica foi adotada considerando que o cobre tem mais capacidade de dissipação térmica com o ar.

Na Figura 6 são apresentados os três módulos utilizados para realização dos ensaios.

Figura 6. Módulos de LED ensaiados



Fonte: O autor (2016).

Nas imagens anteriores, é possível notar que, em ambos os módulos, existem regiões que apresentam manchas em sua coloração, provenientes do efeito térmico causado pelo calor produzido pelos LEDs. As manchas são um indicativo de que algumas das regiões do módulo operam com maior aquecimento.

Para avaliação do rendimento luminoso dos módulos, as manchas não representam informações valiosas. Entretanto, é necessário realizar uma medição do fluxo luminoso e este, por sua vez, será apresentado no item a seguir.

Ensaio realizados

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados para realização das medições de fluxo luminoso, os resultados das medições e uma relação custo x benefício.

Equipamentos e medições

Para a realização dos ensaios luminotécnicos, foram utilizados uma esfera integradora com 2 metros de diâmetro, o multiphotometro PHOTO 2000J e a fonte de tensão WY, ambos do fabricante Everfine. Resumidamente, a esfera integradora e o multiphotometro servem para medir o fluxo luminoso de uma fonte luminosa.

Na Figura 7 será apresentado o equipamento utilizado. Já a fonte de tensão é uma fonte de tensão contínua, com ajuste da tensão e corrente de saída, resolução de 100uV e 10uA, utilizada para fornecer a corrente de 750mA, necessária para alimentar os módulos de LED.

Figura 7. Equipamentos de medição



Fonte: Disponível em: <<http://www.everfine.net/>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

Para a realização das medições dos módulos de LED, foram utilizados os padrões de medições apresentados a seguir:

- Dentro da esfera integradora, os módulos foram colocados apontando o fecho luminoso para baixo e em uma altura de um metro do perímetro interno da esfera.
- Temperatura ambiente de 25°C.
- Corrente de alimentação do módulo em 750mA.
- Medição do fluxo luminoso e cinco minutos após alimentação do módulo.

A primeira medição realizada, denominada de zero hora, ocorreu 30 minutos após a realização da alimentação do módulo. A partir desse momento, os módulos permaneceram ligados continuamente até atingirem 4.300 horas ligados. Ainda, as medições intermediárias foram realizadas conforme apresentado pelo Quadro 3, a seguir.

Quadro 3. Medições fluxo luminoso

HORAS	0	200	500	700	900	1200	1560	1752	2040	2500	3000	4300
PCI 1	2008	2037	2068	2010	2010	1975	1893	1872	1845	1729	1650	1507
PCI 2	1925	1939	1954	1903	1900	1876	1794	1759	1729	1646	1547	1367
PCI 3	1946	1957	1969	1921	1915	1881	1816	1785	1758	1644	1551	1376

Fonte: O autor (2016).

Com os dados obtidos nos 12 intervalos de medições realizadas, é possível calcular a depreciação para cada intervalo, considerando como base de cálculo, para a depreciação, a medição em zero hora. Os resultados são apresentados no Quadro 4. Nele é possível observar que nas primeiras medições realizadas houve um acréscimo no fluxo luminoso, proporcionado pelas características dos LEDs.

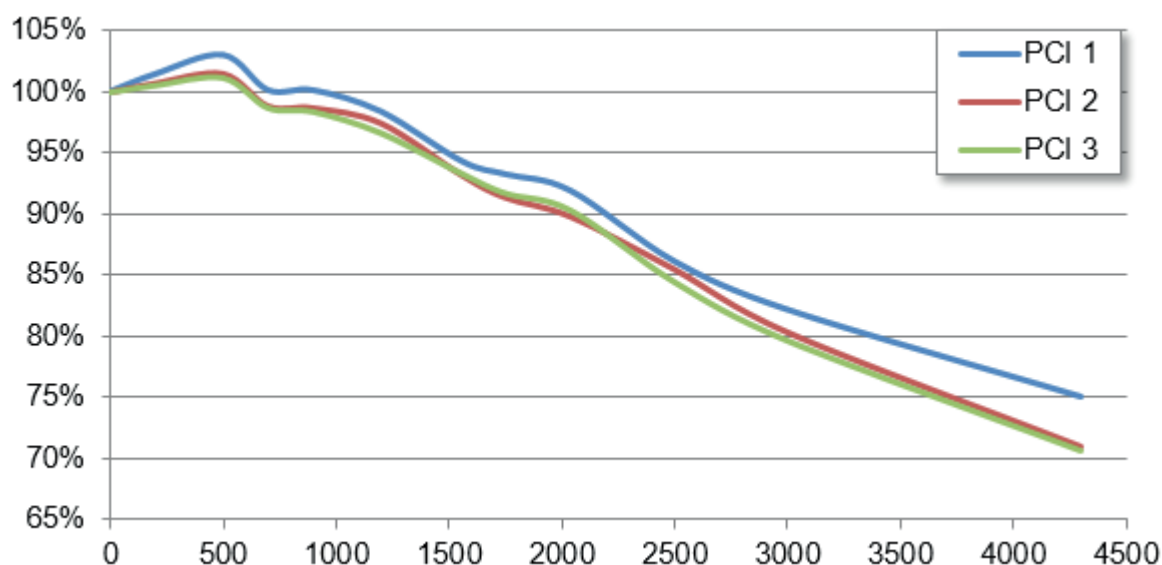
Quadro 4. Depreciação do Fluxo Luminoso

HORAS	0	200	500	700	900	1200	1560	1752	2040	2500	3000	4300
PCI 1	100%	101%	103%	100%	100%	98%	94%	93%	92%	86%	82%	75%
PCI 2	100%	101%	102%	99%	99%	97%	93%	91%	90%	86%	80%	71%
PCI 3	100%	101%	101%	99%	98%	97%	93%	92%	90%	84%	80%	71%

Fonte: O autor (2016).

Com os dados contidos no Quadro 4, é apresentada a Figura 8.

Figura 8. Curvas de depreciação



Fonte: O autor (2016).

De acordo com a Portaria nº 477, de 24 de novembro de 2013, o tempo de operação transcorrido é denominado de **vida nominal da manutenção do fluxo luminoso**. Duas são as categorias denominadas, L_{80} e L_{70} , sendo a segunda opção a mais adotada pelos fabricantes. Considerando a segunda opção, a vida útil de uma lâmpada LED terá seu fim quando atingir 70% da sua iluminação de saída inicial.

Sendo assim, observando novamente o gráfico da Figura 8, temos a conclusão de que todas as PCIs seriam classificadas dentro dos padrões L_{70} , podendo ser declaradas com 4.000 horas úteis. Entretanto, a PCI 1 apresentou melhor resultado.

Relação custo x benefício

Cada fabricante de PCI se caracteriza por se especializar em determinadas linhas de placas de circuito impresso, placas em MCPCB, *multi-layer*, alta precisão, dentre outras características. Para a análise da relação custo x benefício, obtivemos cotações com diversos fabricantes, entretanto são apresentados os valores do fabricante com menor custo médio. O Quadro 5 mostra o custo por peça para um lote de fabricação de 100 unidades, bem como a relação custo x benefício. A relação é feita entre o custo unitário e a depreciação total.

Quadro 5. Valor unitário e custo x benefício

PCI	Material	Valor Unitário	Custo x Benefício
1	Composite (CEM) 1,6mm	R\$ 5,28	7,04
2	Fibra dupla face (FR4) 1,6mm	R\$ 6,20	8,73
3	Fibra dupla face (FR4) 0,8mm	R\$ 6,48	9,16

Fonte: O autor (2016).

Os valores obtidos da relação custo x benefício indicaram que o material de base ‘Composite’ apresentou melhor resultado. Dentre os materiais de base de Fibra, a PCI 2 apresentou melhor resultado quando comparada com a PCI 3, causado pelo fato de a PCI3, com menor espessura, apresentar maior custo.

Conclusão

O objetivo da realização dos comparativos foi motivado por alguns fatores: quando é desenvolvido um produto, a combinação de LED, baixo custo e qualidade e o tipo de material utilizado para produção da PCI. Caso a prioridade fosse a qualidade, as placas com base em alumínio, conhecidas como MCPCB, seriam utilizadas, entretanto afetariam consideravelmente o quesito ‘baixo custo’.

Quanto aos modelos PCI 2 e PCI 3, que foram fabricados com a face oposta à dos componentes, totalmente coberta pelo laminado de cobre, esperava-se que a característica auxiliaria na dissipação de calor. Entretanto, o benefício de ter um auxílio da dissipação do calor é ofuscado pelo material de base das PCIs, formado por fibra de vidro, amplamente utilizado para isolamento em fornos.

Ainda, apesar de a PCI com 0,8mm ter o custo mais elevado, a menor espessura poderia ser um fator para propiciar melhores resultados de desempenho luminoso, fato que não ocorreu. Além disso, a PCI 1 não teve sua face oposta coberta pelo laminado de cobre por não ser possível fabricar PCIs com dupla face e material de base em composite.

Pelos estudos apresentados, é possível visualizar claramente que a PCI 1, fabricada com material de base de composite, apresentou melhores resultados, tanto em relação ao custo, quanto em relação ao melhor desempenho luminoso.

Referências

BRASIL. Portaria N° 477, de 24 de setembro de 2013. Seção 1, p. 78. Disponível em: <http://

www.jusbrasil.com.br/diarios/59637231/dou-secao-1-27-09-2013-pg-78>. Acesso em: 29 nov. 2016.

_____. **Portaria N° 389, de 25 de agosto de 2014**. Seção 1, p. 119. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/75589247/dou-secao-1-27-08-2014-pg-119>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

_____. **Portaria N° 144, de 13 de março de 2015**. Seção 1, p. 95. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/88014658/dou-secao-1-17-03-2015-pg-95>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

FREITAS, Luciana. LED: A tecnologia do presente. **Lumière Electric**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/embed/view/W2XViV2RuQFFxfWL>>. Acesso em: 20 out. 2016.

MATTOS, Waleria. Aperfeiçoando a qualidade. **Lumière Electric**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/embed/view/W2XViV2RuQFFxfWL>>. Acesso em: 12 set. 2016.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

PROJETO, FABRICAÇÃO E OPERAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE EROÇÃO POR CAVITAÇÃO

Design, manufacture and operation of an erosion test machine by cavitation

Charles Zanini Miranda¹

Resumo: O presente trabalho consiste no projeto, construção e operação de uma máquina de ensaio de erosão por cavitação e nos primeiros resultados obtidos por meio do equipamento. Um novo conceito de máquina de ensaio de erosão por cavitação foi projetado, construído e ensaiado, usando um disco rotativo com furos e pinos indutores de cavitação. O equipamento projetado possui como principais vantagens o baixo custo de fabricação devido ao menor tamanho do equipamento, número reduzido de componentes, a quantidade de até oito amostras por ensaio e a menor potência necessária para realização dos ensaios. A erosão por cavitação é responsável por danos causados nas superfícies expostas ao fenômeno. O equipamento é capaz de ensaiar simultaneamente oito corpos de prova de diferentes materiais, o que demonstra a variedade possível de materiais de estudos que pode ser feita em conjunto e em reduzidos períodos de tempo.

Palavras-chave: Projeto. Disco rotativo. Erosão. Cavitação. Metais.

Abstract: The present work consists of the design, construction and operation of a cavitation erosion test machine and the first results obtained by this equipment. A new concept of cavitation erosion testing machine was designed, constructed and tested using a rotary disk with cavitation-inducing holes and pins. The main advantages of the designed equipment are the low cost of manufacturing due to the smaller size of the equipment, reduced number of components, the quantity of up to eight samples per test and the smaller power required to carry out the tests. Cavitation erosion is responsible for damage to the surfaces exposed to this phenomenon. The equipment is capable of simultaneously testing eight kind of different materials, which demonstrates the possible variety of study materials that can be done together in reduced periods of time.

Keywords: Design. Rotary disk. Erosion. Cavitation. Metals.

Introdução

Há milênios, o homem busca o desenvolvimento de equipamentos objetivando o aumento de produtividade e redução de esforços humanos em suas atividades. Neste contexto, a engenharia o auxilia no desenvolvimento de máquinas e dispositivos para este fim. Dentre as máquinas mais importantes em nosso cotidiano, podemos citar as máquinas de fluxo, que são utilizadas para oferecer energia em um fluido ou para converter energia em trabalho mecânico.

Dentre os problemas comuns em máquinas de fluxo, destaca-se o fenômeno da cavitação, que consiste, simploriamente, no aparecimento e posterior desaparecimento de bolhas de vapor no fluxo líquido devido a um gradiente de pressão (PETERMANN; PFLEIDERER, 1979). O desaparecimento das bolhas se deve ao colapso destas ao entrarem em uma região com maior pressão hidrostática. O ciclo de vaporização e colapso produz níveis de pressões de centenas de MPa, ocasionando efeitos muitas vezes indesejados e agressivos nos equipamentos.

Portanto, uma primeira justificativa para o presente trabalho seria o prejuízo causado pelos danos resultantes da erosão por cavitação. O estudo do fenômeno com diferentes materiais, bem como de possíveis revestimentos nos materiais atualmente empregados, poderia resultar em considerável economia para fabricantes, usuários de máquinas e equipamentos hidráulicos. A máquina de erosão possibilita ensaiar diversos materiais e/ou revestimentos, buscando a melhor opção em termos de resistência à cavitação.

¹ Faculdade Leonardo da Vinci – SANTA CATARINA

Além disso, o campo de aplicação do fenômeno cavitação tem se ampliado consideravelmente, podendo-se destacar:

Aplicações físicas:

a) A cavitação limita a máxima potência acústica emitida pelo sonar. Quando a amplitude da pressão acústica utilizada excede o valor limite, ocorrerá cavitação.

b) Os grandes transformadores são preenchidos com um óleo especial para dissipar calor e fornecer propriedades dielétricas. Tem-se observado a presença de bolhas de gás no óleo quando da deterioração dos transformadores. A detecção prévia de bolhas indicará a necessidade de manutenção ou substituição do transformador, prevenindo a ocorrência de falhas.

Aplicações industriais:

a) A cavitação pode ser utilizada para emulsificar um sistema formado por dois líquidos imiscíveis, como água e óleo. Quando a cavitação ocorre na interface dos dois líquidos, pequenas gotas de um líquido são forçadas para dentro do outro, valendo-se da energia liberada no processo.

b) Uma outra aplicação é a limpeza ultrassônica em articulações, as quais são depositadas em um tanque de aço inoxidável contendo um solvente. Como as bolhas tendem a se formar preferencialmente em cantos e fendas, esses serão os locais mais atingidos pelo processo de limpeza devido ao colapso das bolhas.

c) A eficiência no corte de materiais, valendo-se da cavitação em jatos submersos, tem sido maior quando comparada com jatos ao ar livre, sem cavitação (YOUNG, 1989).

O estudo do fenômeno da cavitação tem sua importância aumentada devido ao aperfeiçoamento dos sistemas hidráulicos. Na atualidade, as máquinas são projetadas para operar no limite de sua melhor eficiência, objetivando ganhos de produtividade e redução de custos de aquisição de equipamentos. Além disso, devido ao aumento da competitividade entre os fabricantes de equipamentos, há a necessidade do desenvolvimento de diferentes tipos de materiais para utilização nas mais variadas aplicações e aumento da vida útil da máquina.

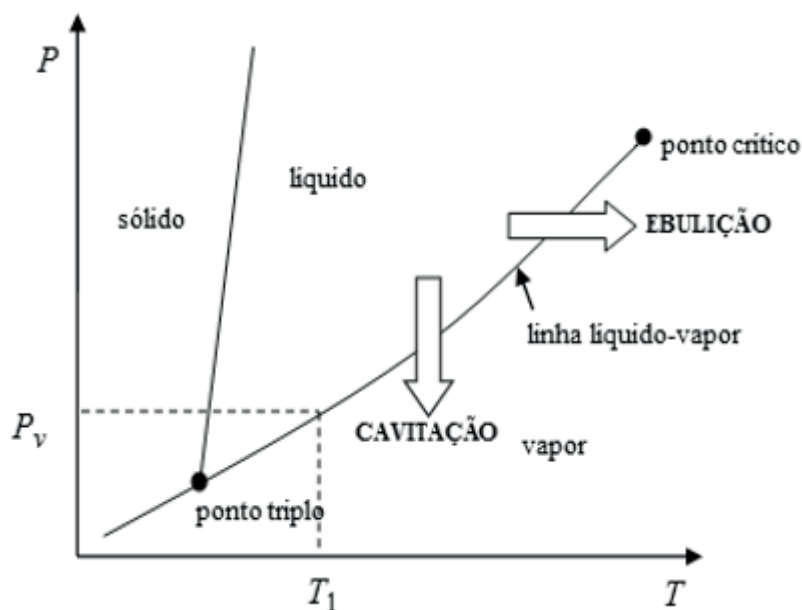
Fundamentação teórica

A palavra cavitação tem origem do latim “*cavus*”, que significa buraco ou cavidade, e é utilizada para descrever o processo de nucleação, crescimento e colapso das bolhas de vapor em um fluido. A cavitação é um fenômeno físico pertinente somente à fase líquida das substâncias, podendo ser observado em diversos sistemas hidrodinâmicos, como em hélices de navios, bombas radiais, bombas centrífugas, turbinas e válvulas, sendo na maioria das vezes indesejada a sua presença, pois provoca redução na eficiência do equipamento (KOIVULA, 2000) e desgaste superficial por erosão. A perda da eficiência está associada a três efeitos pertinentes à cavitação: geração de ruído, vibração e a erosão.

O primeiro passo para estudarmos a cavitação é o entendimento do processo físico relacionado ao surgimento e desaparecimento das bolhas de vapor. A Figura 1 mostra um gráfico típico idealizado de uma substância pura, relacionando a pressão (P), a temperatura (T) e o volume específico (v), e cada estado físico da substância é indicado no gráfico.

Em uma substância pura (BRENNEN, 1995), a fase líquida e a fase vapor podem coexistir em equilíbrio somente em uma determinada linha, correlacionando pressão e temperatura. Essa linha é chamada de linha líquido-vapor e se estende desde o ponto-tríplo até o ponto crítico. Fora da linha, uma fase da substância é mais estável do que a outra. No ponto-tríplo, as três fases (líquido, vapor e sólido) coexistem, ou seja, a substância pode ter três alternativas de estados estáveis.

Figura 1. Gráfico do diagrama de fase



Fonte: Brennen (1995).

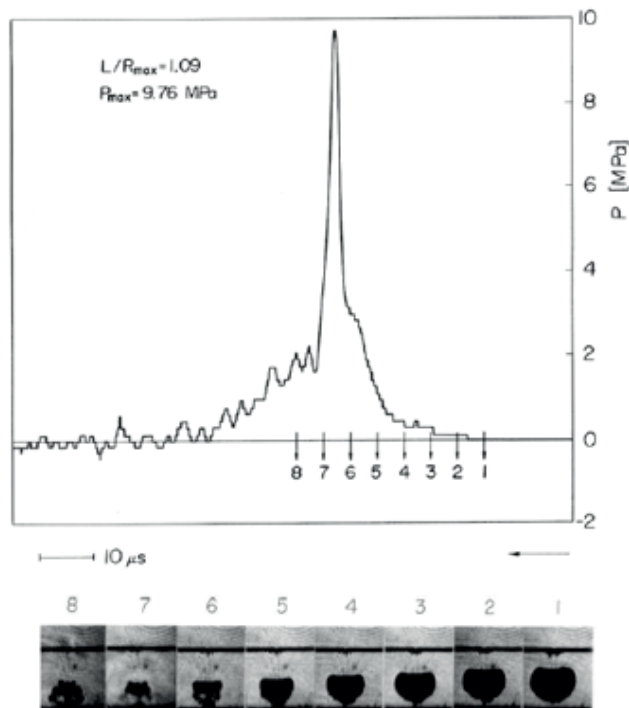
Com a formação das bolhas de vapor, há uma mudança nas características do escoamento, que pode se tornar transiente. A mudança pode ocasionar oscilações no escoamento e vibrações na máquina que, por consequência, podem afetar o rendimento do sistema hidráulico. Também, com o colapso das bolhas, ocorre um microjato d'água na superfície e a formação de ondas de choque, ocasionando desgaste por erosão (BRENNEN, 1995). A cavitação em máquinas hidráulicas apresenta o surgimento de efeitos indesejados, como: instabilidade no escoamento do fluido, vibração, ruído excessivo e desgaste superficial nas paredes das superfícies metálicas (ESCALER et al., 2006).

Uma das consequências da cavitação pode ser observada nos componentes mecânicos das máquinas hidráulicas: quando estas estão submetidas à cavitação constante, pode ocorrer falha mecânica devido ao desgaste por erosão das superfícies sólidas, ou seja, há perda considerável de massa da superfície, que afeta o desempenho da máquina, podendo levar o componente à falha mecânica. A degradação mecânica das superfícies metálicas provocada pela cavitação é chamada de erosão por cavitação (KOIVULA, 2000). O desgaste por erosão é consequência da repetibilidade do colapso das bolhas nas proximidades das superfícies sólidas das máquinas hidráulicas.

A Figura 2 mostra uma série de fotografias do colapso de uma bolha perto de uma superfície sólida. Nitidamente, é observada a formação assimétrica da bolha e o desenvolvimento do microjato, que está direcionado para a superfície sólida (BRENNEN, 1995). Na mesma figura, é traçado um gráfico de pressão correspondente ao instante de cada foto, conforme a

numeração, demonstrando a variação da pressão durante a cavitação. Observa-se que entre as fotos 6 e 7 há um pico de pressão que corresponde a um mínimo de volume da bolha provocado pela formação do microjato.

Figura 2. Fotografias em série do colapso de uma bolha e o gráfico da pressão na bolha

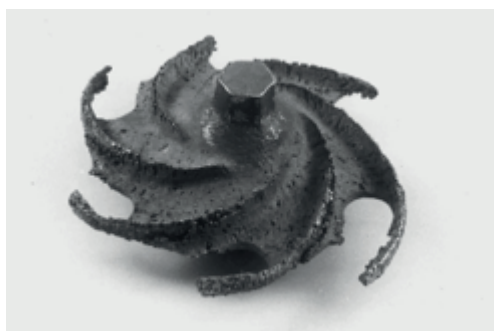


Fonte: Brennen (1995).

A Figura 3 (BENNEKOM; BERNDT; RASSOOL, 2001) mostra a falha mecânica causada pela erosão por cavitação em um rotor de aço inox. Pode-se notar que houve uma completa danificação do componente, e claramente são verificados os pits de erosão por toda a extensão do rotor. O rotor foi utilizado em uma bomba e o fluido era o sulfato de níquel e ácido sulfúrico (pH entre 2 e 3), com escoamento entre 1.300 e 2.000 l/min.

Falhas assim dependem custos de manutenção e troca de componentes, além dos elevados tempos de parada de máquina, que podem ser evitados quando há um monitoramento do equipamento para que não ocorra a cavitação. A cavitação pode ser controlada por diversos métodos, que variam desde o melhoramento dos materiais empregados nos componentes do equipamento até o uso de inibidores de formação de vapor no líquido (BENNEKOM; BERNDT; RASSOOL, 2001).

Figura 3. Falha por cavitação e corrosão de um rotor de aço inox 316



Fonte: Bennekom, Berndt e Rassool (2001).

Materiais e métodos

A máquina de ensaio de erosão por cavitação construída consiste em uma câmara de aço inoxidável e um disco rotativo e serão fixados os diversos corpos de prova a serem estudados. O disco é colocado dentro da câmara, fica imerso em água e é submetido a uma rotação através de um motor elétrico. A cavitação é provocada por furos ou pinos existentes no disco, que têm a função de formar as bolhas (indutores de cavitação), sendo que o colapso das bolhas ocorrerá na superfície dos corpos de prova fixados no disco.

A máquina está instalada em uma bancada com uma estrutura metálica e amortecedores foram montados nos pés da estrutura para absorver as vibrações causadas pelo equipamento, quando em operação.

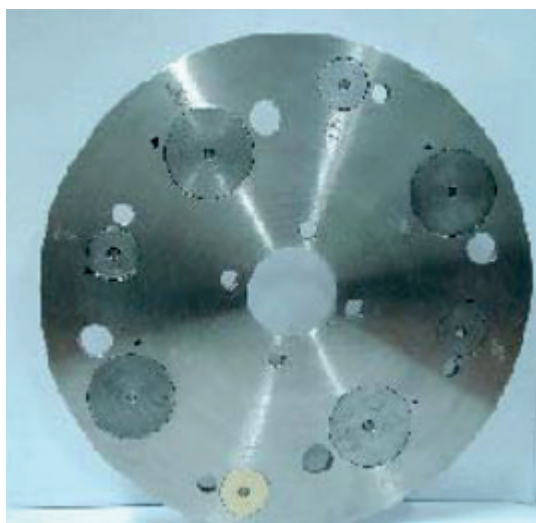
Na Figura 4, podemos verificar o equipamento e seus acessórios e, na Figura 5, é mostrada a disposição dos corpos de prova no disco de aço inoxidável. Também notamos a presença dos furos indutores das bolhas. Nos furos, podem ser fixados pinos que também possuem a função de induzir a formação das bolhas através da formação de uma esteira a jusante.

Figura 4. Foto do equipamento de ensaio de erosão por cavitação



Fonte: O autor (2007).

Figura 5. Disco de aço inoxidável com disposição dos corpos de prova

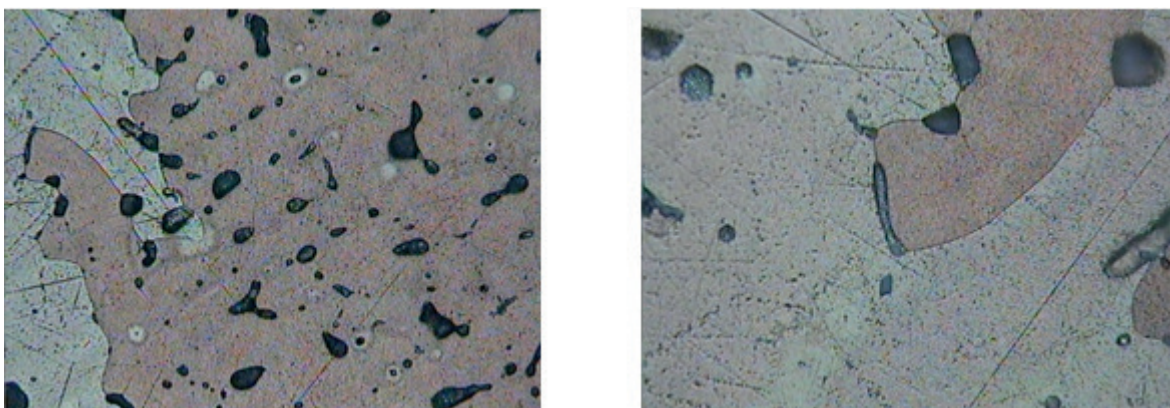


Fonte: O autor (2007).

O ensaio de erosão por cavitação é constituído basicamente de um disco de aço inoxidável contendo diversos corpos de prova, que são submetidos a uma rotação constante, dentro de um meio líquido. Com a rotação do disco ocorrerá a formação e implosão de bolhas de vapor nas proximidades da superfície dos corpos de prova. A sequência de eventos provoca erosão na superfície dos corpos de prova, que posteriormente serão estudados.

Nos ensaios de erosão por cavitação foram utilizados corpos de prova de bronze. Os corpos de prova foram doados pela empresa Schneider Motobombas e fornecidos com as dimensões necessárias para a correta fixação no disco de aço inoxidável. Conforme pode ser visualizado na Figura 6, os corpos de prova tiveram sua superfície polida para posterior visualização no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

Figura 6. Micrografia do bronze com aumento de 200x e 500x



Fonte: O autor (2007).

Foi definida uma duração de cada intervalo de ensaio de cinco horas, totalizando 25 horas de ensaio. Em cada intervalo de cinco horas de ensaio, o motor foi desligado e o equipamento desmontado, os corpos de prova foram lavados com água corrente e secos com o auxílio de ar comprimido para completa eliminação de qualquer tipo de impureza presente na água da câmara. A presença de impurezas na superfície dos corpos de prova, além de dificultar a análise no MEV, também poderia alterar os valores das massas medidas, ocasionando maiores erros na análise. Então, os corpos de prova foram pesados em uma balança digital de precisão 0,1 mg e tiveram sua massa registrada e a superfície analisada no MEV.

Terminada a análise no MEV, os corpos de prova foram recolocados na posição correta no disco de aço inoxidável para continuação do ensaio até as 25 horas determinadas, com os intervalos de 5, 10, 15, 20 e 25 horas para pesagem e análise no MEV.

Resultados e discussão

Nos ensaios realizados no laboratório, a máquina mostrou-se eficiente na formação das bolhas de vapor, conforme podemos visualizar na Figura 7. A foto foi obtida com a máquina em funcionamento durante os ensaios e notamos a formação das bolhas necessárias para ocorrência do fenômeno da erosão por cavitação. São fotos do equipamento operando em regime permanente.

Figura 7. Nuvem de bolhas de vapor na câmara



Fonte: O autor (2007).

No Quadro 1, podemos observar os valores da variação das massas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de erosão por cavitação, medidos após os intervalos de 5, 10, 15, 20 e 25 horas.

Quadro 1. Variação da perda de massa dos CDP's de bronze

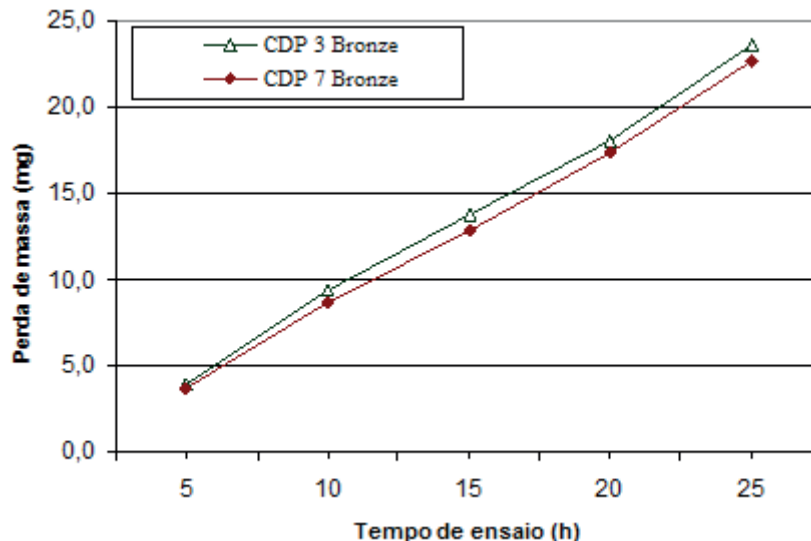
Tempo (h)	Variação da massa dos CDP's (mg)	
	CDP 3	CDP 7
5	3,9	3,8
10	9,3	8,7
15	13,8	12,9
20	18,1	17,4
25	23,6	22,7

Fonte: O autor (2007).

Nos gráficos das figuras 8, 9 e 10, podemos observar as curvas da perda de massa resultantes da erosão por cavitação obtida nos ensaios. Nos gráficos, as curvas relacionam a variação de massa perdida em relação ao tempo de ensaio para os corpos de prova estudados.

Pela observação das curvas obtidas com os corpos de prova de bronze, é possível notarmos que apresentaram uma perda de massa aproximadamente constante durante o ensaio, representado pela linearidade do gráfico e pelas similaridades dos resultados obtidos pelos dois corpos de prova. Assim, pode-se concluir que o bronze é um material bastante propenso à erosão quando submetido ao ensaio de cavitação. O resultado era esperado devido à sua menor microdureza, quando comparado aos demais materiais utilizados para a aplicação.

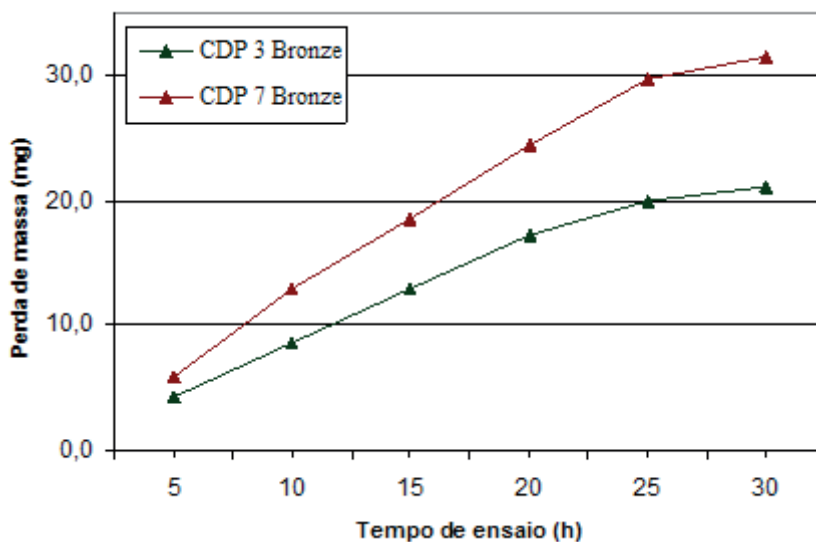
Figura 8. Curva experimental da perda de massa, disco rotativo com furos indutores



Fonte: O autor (2007).

Os corpos de prova em bronze também foram submetidos a outro ensaio de erosão por cavitação, porém com a colocação de pinos indutores de cavitação no disco rotativo, permanecendo os demais parâmetros do ensaio anterior. Os pinos são adaptados nos furos indutores através de parafusos de fixação. Os corpos de prova de bronze foram colocados nas mesmas posições dos corpos de prova ensaiados apenas com os furos indutores de cavitação. Os resultados podem ser visualizados na Figura 9 e, para este ensaio, o tempo foi estendido para até 30 horas.

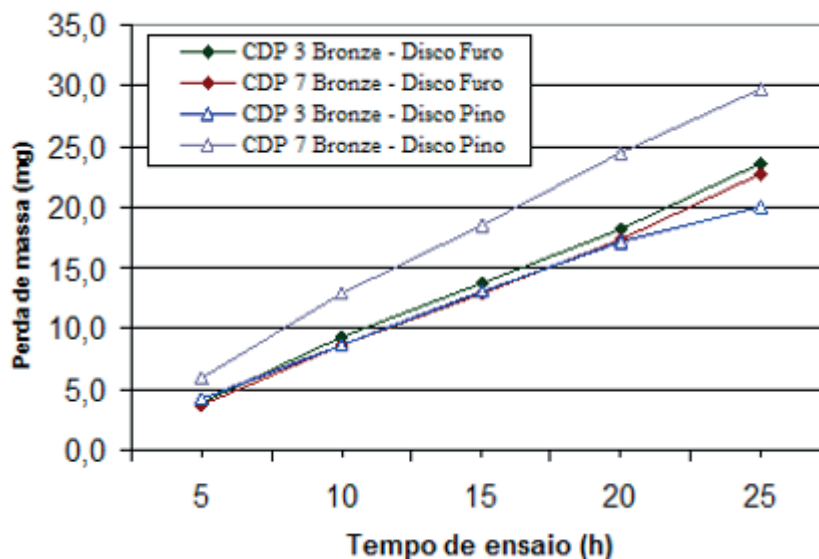
Figura 9. Curva experimental da perda de massa, disco rotativo com pinos indutores



Fonte: O autor (2007).

Sobrepondo os gráficos das Figuras 8 e 9, observamos que as curvas de perda de massa obtidas com os furos indutores de bolhas apresentaram uma uniformidade em seus resultados, pois não há praticamente divergências nos valores. Já os resultados obtidos com a utilização de pinos indutores apresentam curvas não uniformes, e os valores de perda de massa obtidos estão muito dispersos.

Figura 10. Comparação entre as curvas experimentais, com furos e pinos indutores de bolhas



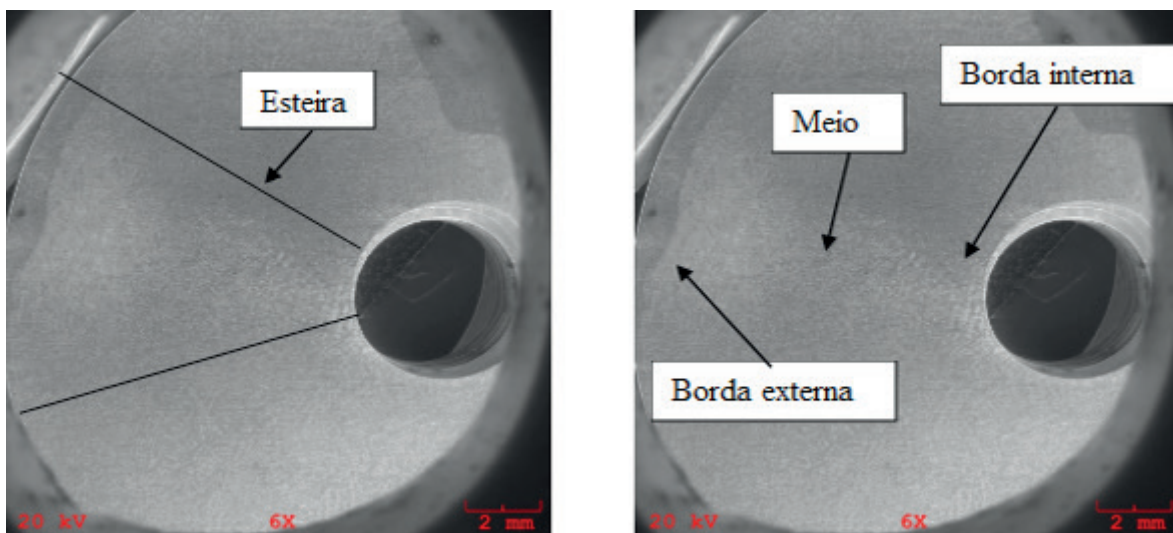
Fonte: O autor (2007).

Para facilitar a compreensão e melhor analisar as superfícies dos corpos de prova, estes foram analisados no microscópio eletrônico de varredura (MEV) para caracterização das superfícies que sofreram erosão por cavitação.

Os corpos de prova em bronze foram os que sofreram maior perda de material por erosão em comparação aos demais. Ao analisarmos no MEV os corpos de prova em bronze, nota-se com muita clareza a grande incidência de pits de erosão em uma determinada área do corpo de prova. A área foi delimitada conforme a Figura 11 e é chamada de esteira de erosão.

Devido à concentração de pits de erosão na chamada esteira, esta região foi definida para análise no MEV. Para melhor compreender e comparar a distribuição dos pits de erosão na esteira, esta foi dividida em três áreas para análise, que são denominadas: borda interna, meio e borda externa. A divisão pode ser observada na Figura 12. Dessa forma, podemos comparar qualitativamente e quantitativamente a evolução da formação dos pits de erosão com relação ao tempo de ensaio.

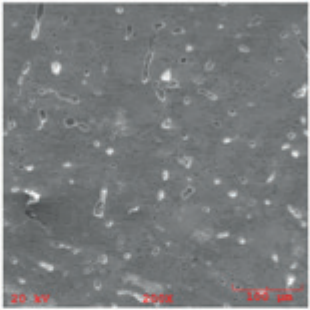
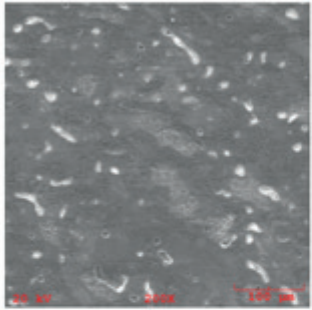
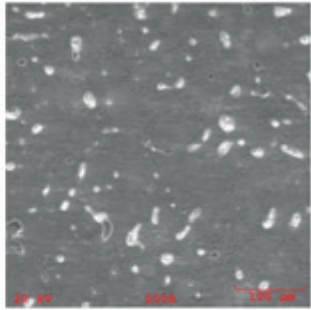
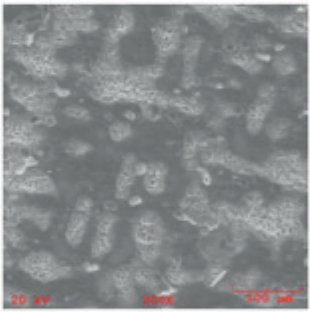
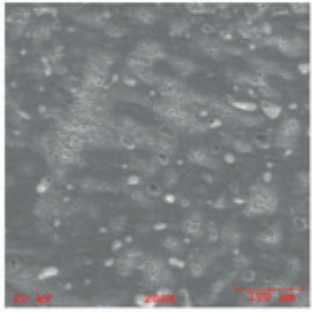
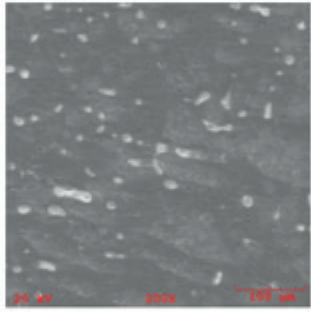
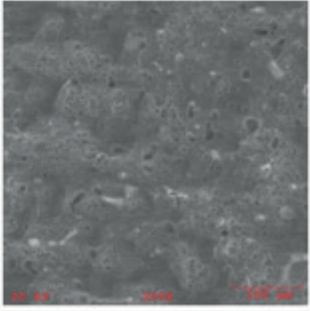
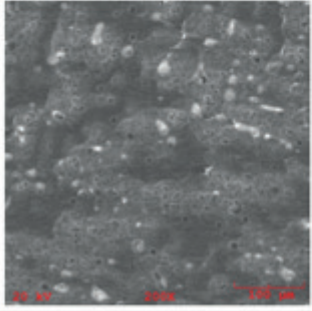
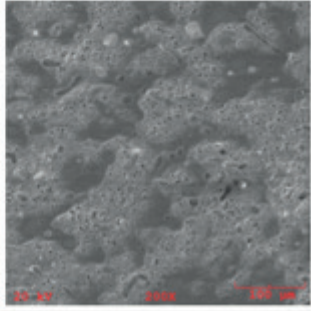
Figura 11. Visualização da esteira de erosão. Foto obtida no MEV



Fonte: O autor (2007).

A sequência de fotos a seguir, Figura 12, mostra a evolução dos pits de erosão com relação ao tempo de ensaio. As fotos são das regiões denominadas **borda interna**, **meio** e **borda externa** do corpo de prova de bronze. Observamos que apesar das porosidades e inclusões do material, já com cinco horas de ensaio é detectada a presença da erosão, ou seja, a formação dos pits de erosão no corpo de prova de bronze possui uma acentuada evolução e os tempos de ensaio deveriam ser menores para uma análise mais apurada. O acontecimento é devido à baixa dureza do material, que propicia a formação das regiões erodidas em consequência das pressões envolvidas no fenômeno da cavitação.

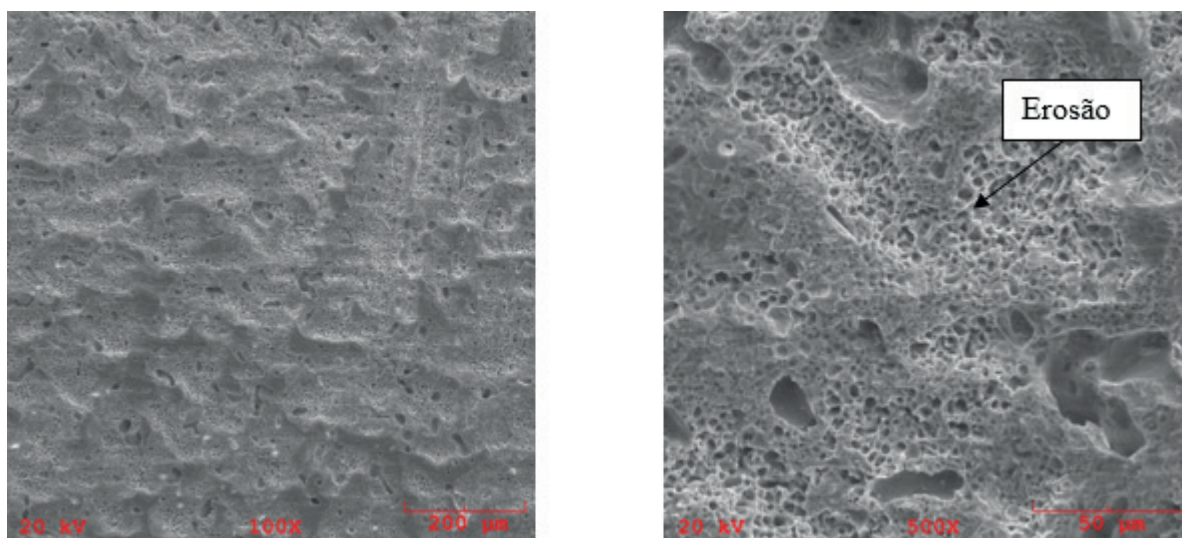
Figura 12. Sequência de fotos da evolução da erosão por cavitação

Tempo de ensaio	Localização		
	Borda interna	Meio	Borda externa
5 horas			
10 horas			
20 horas			

Fonte: O autor (2007).

A foto da Figura 13 ilustra bem a afirmação pois, com o tempo de ensaio de 25 horas, toda a superfície da amostra sofreu erosão, o que demonstra a pouca resistência à erosão por cavitação do material estudado. Na figura, também podemos notar a superfície erodida por cavitação com um aumento de 500x no MEV após 25 horas de ensaio.

Figura 13. Foto do bronze com aumento de 100 e 500x, com 25 horas de ensaio



Fonte: O autor (2007).

Conclusões

A máquina de ensaio de erosão por cavitação demonstrou ser um equipamento eficiente na formação da cavitação e na ocorrência da erosão das amostras, provocadas pelo colapso das bolhas de vapor. Na Figura 7, constatamos visualmente as formações das bolhas de vapor provocadas pela rotação do disco na câmara d'água. Na figura, o equipamento estava operando em uma rotação constante de 4400 rpm.

Ao analisarmos os gráficos de massa perdida em relação ao tempo de ensaio e as micrografias das crateras no MEV dos diversos corpos de prova utilizados no trabalho, percebemos que além de provocarem a formação das bolhas de vapor, estas colapsaram na superfície dos corpos de prova, formando as crateras ou pits, o que mostra a eficácia do equipamento na sua utilização para estudos do comportamento de materiais expostos à erosão por cavitação.

Referências

BENNEKOM, A.; BERNDT, F.; RASSOOL, M. N. **Pump impeller failures – a compendium of case studies**. Engineering Failure Analysis 8, 2001.

BRENNEN, C. E. **Cavitation and bubble dynamics**. Oxford University Press, 1995.

ESCALER, X.; EGUSQUIZA, E.; FARHAT, M.; AVELLAN, F.; COUSSIRAT, M. **Detection of cavitation in hydraulic turbines**. Mechanical Systems and Signal Processing 20, 2006.

FOX, R. W.; MACDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5. ed. Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2001.

KOIVULA, T. **On cavitation in fluid power**. Proc. Of 1ª PFNI-PhD Symp, Hamburg, 2000.

PETERMANN, H.; PFLEIDERER, C. **Máquinas de fluxo**. Livros Técnicos e Científicos

- LTC, 1979.

PFLITSCH, C.; CURDTS, B.; BUCK, V.; ATAKAN, B. **Wear properties of MOC-VD-grown aluminium oxide films studied by cavitation erosion experiments.** Surface & Coatings Technology 201, 2007.

VIVEKANANDA, P. **Mechanism of cavitation damage influence of stacking fault energy on erosion and erosion resistance of steels and coatings.** Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1983.

YOUNG, F. R. **Cavitation.** McGraw-Hill Book Company, London, 1989.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA MIGRAÇÃO DE EMPRESAS PARA O MERCADO LIVRE DE ENERGIA

Viability analysis for migration of companies for the free energy market

Felipe Amler¹

Julia Grasiela Busarello Wolff²

Resumo: O mercado brasileiro de energia se encontra parcialmente regulado, a possibilidade de expansão do mercado gera oportunidades para o desenvolvimento e implantação de novas estratégias por parte das empresas. É de grande importância que os consumidores conheçam as regras do novo mercado, os riscos envolvidos e ainda critérios que possam melhorar sua análise de compra de energia. Por esse motivo, este projeto tem como objetivo oferecer as informações necessárias para o consumidor que tem a opção de migrar de mercado (consumidor potencialmente livre), conhecer o novo ambiente de contratação e analisar se é benéfica ou não a migração.

Palavras-chave: Energia elétrica. Comercialização. Tarifação. Consumidor livre.

Abstract: The Brazilian energy market is partially regulated, the possibility of expansion of this market generates opportunities for the development and implementation of new strategies by companies, it is of great importance that consumers know the rules of this new market, the risks involved by this choice and criteria that can improve your energy purchase analysis. For this reason, this project aims to offer the necessary information to the consumer who has the option of migrating from the market (potentially free consumer) to know the new hiring environment and to analyze whether or not the migration is beneficial.

Keywords: Electric power. Commercialization. Pricing. Free consumer.

Introdução

A partir da mudança e reestruturação do setor elétrico brasileiro, a energia elétrica passa a ser vista de outra forma por grandes consumidores, sendo essas indústrias com gastos ainda gerenciáveis. Esses gastos passam a ser estudados, pois, com a mudança do setor, surgem oportunidades de diminuição de custos.

Com a reestruturação do setor elétrico brasileiro, surgiu um novo modelo institucional, no qual há dois ambientes de contratação de energia: o ambiente de contratação livre ACL e o ambiente de contratação regulada ACR.

Em relação ao ACR, o consumidor desse mercado não tem escolha de compra, ou seja, terá de comprar energia da distribuidora na qual está instalado. Já o consumidor livre (mercado livre) pode escolher de quem irá comprar a sua energia e somente pagar o preço de rede pela distribuição. Nesses ambientes, contratos bilaterais são formulados entre as partes.

Os contratos possuem maiores flexibilidades e preços negociáveis entre as partes livremente. Assim, há uma competitividade dos agentes de geração e comercialização, abrindo maiores vantagens aos consumidores. Logo, com o estudo do novo mercado e as vantagens que este traz, há motivações para o desenvolvimento deste trabalho. Ainda, surge a necessidade de tomar decisões por parte do consumidor: em qual dos ambientes eu me encaixo? Qual possui

¹ Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSSELVI – Rodovia BR 470 - Km 71 - nº 1.040 – Bairro Benedito – Caixa Postal 191 – 89130-000 – Indaial/SC Fone (47) 3281-9000 – Fax (47) 3281-9090 – Site: www.uniasselvi.com.br

² Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSSELVI – Rodovia BR 470 - Km 71 - nº 1.040 – Bairro Benedito – Caixa Postal 191 – 89130-000 – Indaial/SC Fone (47) 3281-9000 – Fax (47) 3281-9090 – Site: www.uniasselvi.com.br

mais vantagens para meu caso?

O objetivo principal do trabalho é criar uma ferramenta de apoio para a análise de estratégias para a migração do consumidor ao mercado livre de energia, através de vantagens e desvantagens que os mercados apresentam.

Reforma do sistema elétrico brasileiro

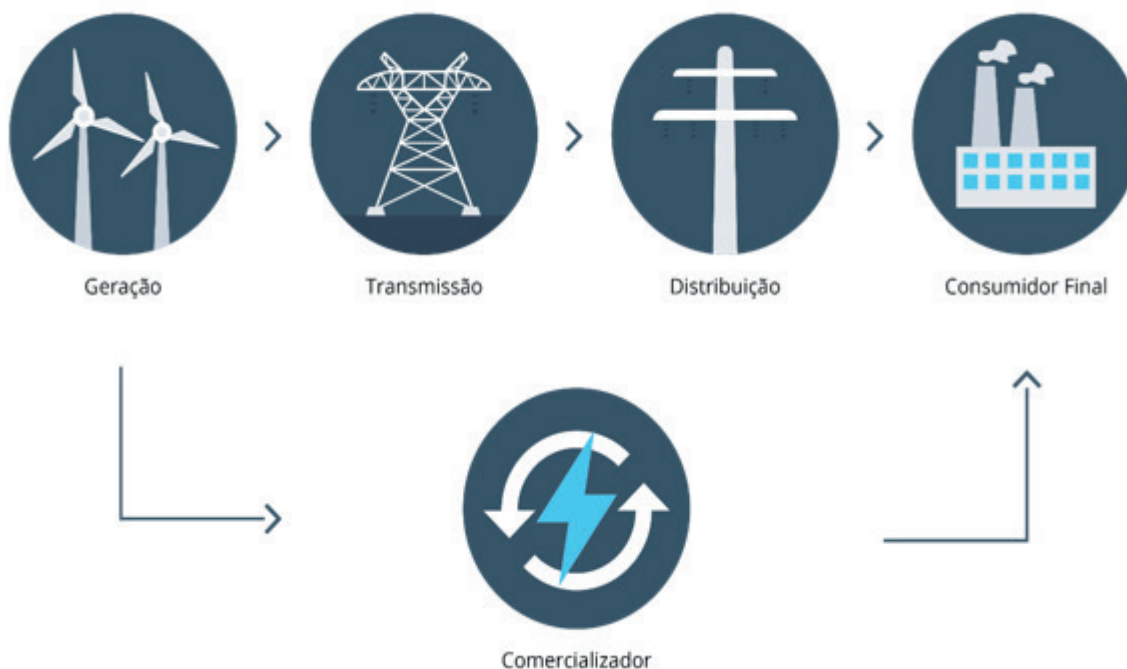
Em 4 de março de 1993, houve a criação da Lei nº 8.631 sobre a reforma do SEB, a qual indica a fixação dos níveis das tarifas para o setor público de energia elétrica, eliminando assim a remuneração garantida, criando contratos entre geradores e distribuidoras. Com a reforma, introduziu-se a figura do consumidor livre e do produtor independente de energia.

No novo modelo criado surgiram, então, quatro segmentos: geração, transmissão, distribuição e comercialização. A criação do mercado livre também é uma novidade e agora a competição entre os segmentos é incentivada. Geração e comercialização competem em busca de novos clientes, com preços de compra e venda de energia (SCARABELOT, 2009).

Novo modelo

O modelo atual está dividido nos quatro segmentos. Exemplificam como funciona o novo modelo elétrico com consumidores livres e cativos.

Figura 1. O novo modelo elétrico brasileiro



Fonte: Adaptado de Soma Energia (2009).

Geração (G)

A geração se resume na produção de energia elétrica. São enquadradas as usinas hidrelétricas e térmicas e também as fontes de geração alternativas e limpas, eólica, biomassa e as PCH's (Pequenas Centrais Hidrelétricas). A energia pode ser vendida nesse segmento tanto no mercado regulado como no livre, pois a competição é incentivada.

Transmissão (T)

Transmissão de energia elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. O transporte é realizado por linhas de transmissão de alta potência, geralmente usando corrente alternada, que de uma forma mais simples conecta uma usina ao consumidor através de uma rede secundária de distribuição (ANEEL, 2011).

Distribuição (D)

Assim como a transmissão, a distribuição tem o papel de transportar a energia aos consumidores finais e ainda repassar com exclusividade a energia para os consumidores cativos. Esse fornecimento é regulado pela ANEEL e cobrado através de tarifas.

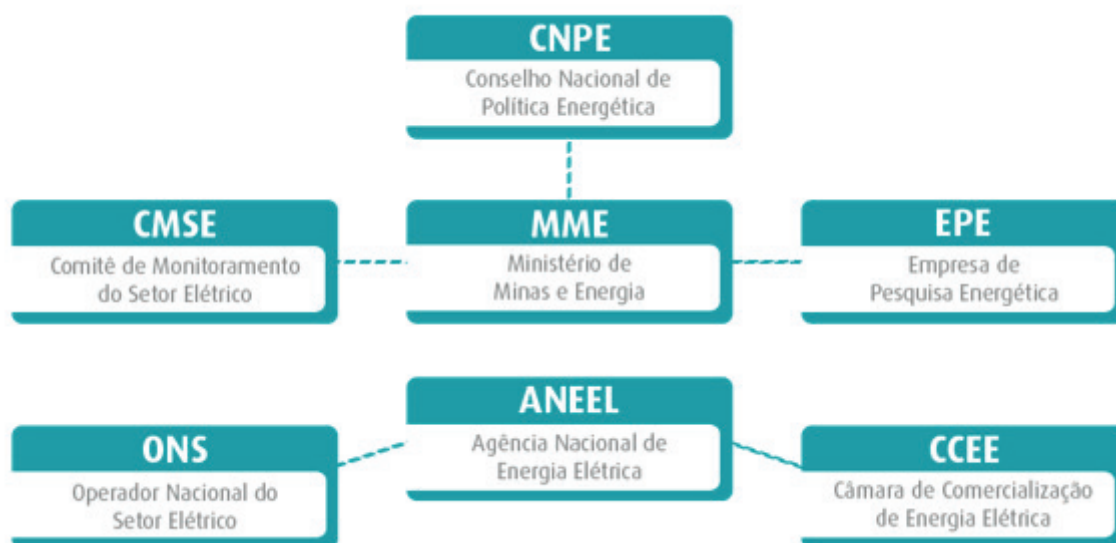
Comercialização (C)

É o segmento que realiza a compra, importação, exportação e venda da energia elétrica aos consumidores livres e fornecedores. A energia que os agentes comercializadores adquirem pode ser vendida tanto para consumidores livres como para distribuidoras através de leilões.

Principais operadores do sistema

Dentre os principais operadores do novo sistema elétrico brasileiro, destacam-se os seguintes:

Figura 2. Fluxograma operadores do sistema



Fonte: Adaptado de Câmara de comercialização de energia (2010).

MME – Ministério de Minas e Energia

O Ministério de Minas e Energia volta a ser criado em 1992 após ser excluído em 1990. Ele tem competência nas áreas de geologia, recursos minerais e energéticos, aproveitamento de energia hidráulica, mineração, metalúrgica e petróleo, combustível e energia elétrica, incluindo a nuclear.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

A Agência Nacional de Energia Elétrica é uma estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia, criada em 1966. Dentre as suas atribuições, está a de fiscalizar e regular os segmentos do SEB (geração, transmissão, distribuição e comercialização). Ela também atende a agentes e consumidores, buscando o equilíbrio entre as partes. Também concede, permite e autoriza instalações e serviços de energia elétrica.

A ANEEL é responsável por garantir tarifas justas, pela qualidade do serviço prestado, investimentos ao setor e, principalmente, estipular a competição entre os operadores do sistema nacional (ANEEL, 2011).

ONS – Operador Nacional do Sistema

O Operador Nacional do Sistema, criado em 1998, tem, dentre suas atribuições, a de realizar o despacho centralizado da geração, sempre buscando a melhor otimização do sistema. Ele é responsável pela coordenação e controle das instalações de geração e transmissão de energia do Sistema Interligado Nacional - SIN. Membros associados e membros participantes são quem constituem o Operador.

As atividades desenvolvidas pelo ONS geram diversos benefícios para os agentes do setor. Dentre elas, a otimização dos recursos de geração e a confiabilidade no uso da rede de transmissão, a garantia de padrões adequados de qualidade e continuidade do suprimento, o aumento da eficiência do serviço de eletricidade, contribuindo para alavancar recursos em investimentos pelas empresas, dentre outros benefícios (ONS, 2009).

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

Ela sucede o antigo Mercado Atacadista de Energia – MAE. A câmara tem como principal papel viabilizar as operações de compra e venda de energia elétrica, registrando e administrando contratos firmados entre geradores, distribuidores e consumidores livres (CCEE, 2010).

Ambientes de contratação de energia elétrica

O consumidor é qualquer pessoa física ou jurídica que solicita à distribuidora a qual se pretende conectar o fornecimento de energia elétrica. Assume a responsabilidade pelo pagamento das faturas e demais obrigações fixadas em regulamentos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

O mercado atual é dividido entre consumidores livres, que têm o direito de escolher seu fornecedor, e consumidores cativos, que estão vinculados à distribuidora. O mercado de energia no Brasil está dividido em ACR - Ambiente de Contratação Regulada, onde estão os consumidores cativos, e ACL - Ambiente de Contratação Livre, formado pelos consumidores

livres (NERY, 2012).

Ambiente de contratação regulada – ACR

Segundo o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, define-se ambiente de contratação regulada como:

Art. 1º - O segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

A compra de posse de energia para comercialização neste ambiente é possível somente pelas distribuidoras, pois elas compram energia através de leilões, com preços definidos pelos agentes geradores.

Essa contratação acontece por contratos firmados bilateralmente entre os consumidores e comercializadores, estes denominados Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado, segundo o artigo 27 do Decreto nº 5.163.

Art. 27º - Os vencedores dos leilões de energia provenientes de empreendimentos de geração novos ou existentes deverão formalizar contrato bilateral denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado - CCEAR, celebrado entre cada agente vendedor e todos os agentes de distribuição compradores.

O consumidor que adquire energia desse ambiente de contratação, ou seja, das distribuidoras de sua região, é considerado consumidor cativo e as distribuidoras são obrigadas a atender totalmente esses consumidores. Por sua vez, os consumidores conectados ao mercado cativo pagam pela energia repassada pela distribuidora através de faturas de energia com tarifas estipuladas pela ANEEL, que são reajustadas anualmente e revisadas a cada quatro ou cinco anos.

O valor das tarifas é o resultado de contratos de longo prazo, com contratação de cento e três por cento da carga e repasse de riscos de diferenças nos preços entre submercados. Também é proveniente do adicional de geração de térmicas quando despachadas e, ainda, do efeito da variação nas tarifas de Itaipu (SCARABELOT, 2009).

Quando o consumidor adquire energia integralmente da concessionária ou permissionária local, é chamado de Mercado Cativo. O consumidor nesse mercado não tem como gerenciar riscos, está exposto a erros e acertos do planejamento feito pelo governo e da concessionária local.

Ambiente de contratação livre – ACL

Segundo o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, define-se ambiente de contratação livre como:

Art. 1º - Ambiente de Contratação Livre – ACL - o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica, objeto de contratos bilaterais livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

Esse tipo de operação é definido como Mercado Livre. A lei define consumidor livre como consumidor que pode escolher o seu fornecedor, atendendo às condições previstas a seguir, de acordo com o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004:

(1º) - Consumidor com instalação anterior ao período da publicação da lei (1995) que possua demanda contratada igual ou superior a 3000 kW e seja atendido em tensão maior ou igual a 69 kV (Art. 15).

(2º) - Consumidor com instalação posterior ao período da publicação da lei (1995), ou seja, consumidor novo que possua demanda contratada igual ou superior a 3000 kW e seja atendido em qualquer tensão (Art. 16).

(3º) - Consumidor que possua demanda contratada igual ou superior a 500 kW e que adquira energia elétrica de PCH's ou de fontes alternativas. Esses consumidores são considerados consumidores especiais.

Assim, concluímos que qualquer consumidor com demanda maior que 500 kW pode se tornar consumidor livre e ter a opção de compra de energia no mercado livre (SCARABELOT, 2009).

Consumidor potencialmente livre

Consideramos Consumidor Parcialmente Livre o Consumidor Livre que exerce a opção de contratar parte das necessidades de energia e potência das unidades consumidoras de sua responsabilidade com a distribuidora local, nas mesmas condições reguladas aplicáveis aos consumidores cativos, incluindo tarifas e prazos.

Com relação à parcela livre, devem ser observados os mesmos itens aplicáveis ao Consumidor Livre, incluindo a obrigatoriedade de ser agente da CCEE e prazos de migração.

Fábricas, shoppings, indústrias que estão enquadradas nessa categoria podem atualmente escolher com quem irão comprar energia para migrar do mercado cativo para o livre.

O consumidor deve observar o prazo de seis meses antes do término do contrato cativo e possuir demanda contratada igual ou maior que 3000 kW em qualquer horário, seja ele ponta ou fora de ponta. Deve estar ligado à rede de distribuição ou de transmissão em nível de tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV se a data de ligação do consumidor ocorreu até 07 de julho de 1995.

Unidades consumidoras ligadas após o período podem estar ligadas em qualquer nível de tensão, bastando que possuam demanda contratada superior a 3000 kW. O consumidor pode “nascer livre” desde que apresente um contrato de uso do sistema de distribuição - CUSD com demanda contratada igual ou maior que 3000 kW em qualquer horário, seja ponta ou fora de ponta.

O consumidor livre deve obrigatoriamente ser agente da CCEE. O processo de retorno para a categoria de consumidor cativo exige que a comunicação seja feita com cinco anos de antecedência.

Com relação à parcela livre, devem ser observados os mesmos itens aplicáveis ao Consumidor Livre, incluindo a obrigatoriedade de ser agente da CCEE e os prazos de migração. O contrato de uso de energia cativa pode ter duração superior a 12 meses, desde que seja permitida a revisão dos montantes contratados a cada período de 12 meses.

Uma carga nova pode ser modelada como especial, desde que apresente o(s) CUSD(s) assinado(s) com montante(s) contratado(s) de 500 kW.

Consumidores especiais possuem demanda contratada igual ou maior que 500 e menor

que 3000 kW, independentemente do nível de tensão. Podem contratar energia proveniente apenas de usinas eólicas, solares, de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) ou hidráulicas de empreendimentos com potência inferior ou igual a 50000 kW (Decreto 5.163/04).

Comunhão de carga para consumidores especiais

Consumidores com o mesmo CNPJ ou localizados em área contígua sem separação por vias públicas podem agregar suas cargas para atingir o nível de demanda de 500 kW exigido para se tornar consumidor especial.

Uma rede de supermercados, com dez unidades consumidoras, todas com o mesmo CNPJ, cada qual com 50 kW de demanda contratada, poderá se tornar um consumidor especial por comunhão de cargas, atingindo determinada demanda requisitada de 500 kW (COMERC, 2009).

Diferenças entre consumidores livres e cativos

No que diz respeito à qualidade da energia e à segurança de sua oferta, não há diferenças entre consumidores livres e cativos, a rede elétrica a ser utilizada é a mesma. Os consumidores livres pagam às companhias de distribuição pelo acesso e uso de suas redes, em valores equivalentes aos que são pagos pelos consumidores cativos. A diferença está na compra da energia.

Para o consumidor cativo, o distribuidor é o fornecedor compulsório, com tarifa regulada e isonômica para uma mesma classe. Define a tensão de fornecimento, podendo ser A1 (230 kV), A2 (88 kV/138 kV), A3 (23 kV/69 kV), A4 (2,3 kV/13,8 kV).

Já para o consumidor livre, a energia é livremente negociada. O consumidor tem obrigação de comprovar 100% de contratação após a medição do montante consumido. O valor de sua energia é resultante de sua opção individual de compra, que poderá incluir contratos de diferentes prazos e maior ou menor exposição ao preço de curto prazo. No mercado livre o consumidor é responsável por gerir incertezas e por seus erros e acertos na decisão de contratação. Assim, o consumidor livre toma para si a tarefa de gerir suas compras de energia e os riscos associados.

A decisão de migrar para o mercado livre é individual do consumidor. Alguns fatores devem ser levados em conta na tomada de decisões: a importância de energia para seu processo produtivo, o valor da energia quando comparado com os custos de seus insumos e com a rentabilidade de seu negócio, além de fatores específicos, como a compatibilidade do perfil de consumo com tarifas do cativo, elasticidade do consumo, capacidade de reduzir ou ampliar consumo, de implementar projetos de eficiência, de consumir outro energético, de deslocar produção no tempo ou espaço, dentre outros. Além disso, deve atender a critérios estabelecidos em lei para ter o direito de escolher (ABRACEEL, 2011).

Possíveis fornecedores de energia elétrica

A energia pode ser disponibilizada aos consumidores do mercado livre por agentes comercializadores, importadores, autoprodutores, geradores e até mesmo por excedentes com outros consumidores livres e especiais, desde que cadastrados como agentes da CCEE. Os consumidores podem comprar energia por meio de contratos de compra de energia incentivada e/ou convencional, conforme escrito a seguir:

Energia convencional: usinas hidrelétricas de grande porte e usinas termelétricas são as fontes mais comuns de energia convencional. Entretanto, no mercado livre, os consumidores

podem adquirir eletricidade de fontes provenientes de energia incentivada.

Energia incentivada: os consumidores que adquirem energia de fontes incentivadas têm direito à redução, entre 50% e 100%, nas tarifas de uso do sistema de distribuição - TUSD e transmissão - TUST. De acordo com a regulamentação vigente, as fontes incentivadas são usinas eólicas, solares, biomassa, hidráulicas ou cogeração qualificada com potência inferior ou igual a 30000 kW. O percentual de desconto depende da data de homologação da outorga ou do registro do empreendimento na ANEEL e do tipo de fonte de geração. Essa medida é um incentivo econômico para o desenvolvimento das fontes renováveis no país.

A compra de energia de agentes comercializadores, diferentemente dos agentes de geração, não possui usinas para gerar energia elétrica. Eles adquirem a energia de diferentes fornecedores, criando um portfólio diversificado de produtos a serem ofertados aos consumidores e para outros agentes compradores. Mesmo que não possuam ativos de geração, os comercializadores estão sob forte regulação e, para obterem autorização da ANEEL, devem possuir capital social integralizado de no mínimo um milhão de reais e comprovar aptidão para o desempenho da atividade. O papel do comercializador é gerir riscos de volume e preço para os geradores e consumidores do mercado livre.

Nodal – Programa de Simulação de Tarifas

Este programa tem como objetivo principal calcular as tarifas de uso dos sistemas de transmissão. A metodologia nodal utilizada resulta em tarifas que são pagas pelos geradores e cargas em função de sua localização eletrográfica no sistema.

Componentes na fatura de energia

Independentemente da distribuidora, a fatura de energia apresenta algumas informações importantes que estão descritas a seguir:

Tipo de consumidor: industrial, comercial, residencial.

Estrutura tarifária: horo-sazonal azul, horo-sazonal verde.

Grupo tarifário: define a tensão de fornecimento, podendo ser A1 (230 kV), A2 (88 kV/138 kV), A3 (23 kV/69 kV), A4 (2,3 kV/13,8 kV).

Demanda contratada na ponta: fio contratado no horário de ponta (normalmente das 18h às 21h).

Demanda contratada fora de ponta: fio contratado no horário fora de ponta (normalmente das 0h às 18h e das 21h às 24h).

Consumo na ponta: energia consumida no horário de ponta (normalmente das 18h às 21h).

Consumo fora de ponta: energia consumida no horário fora de ponta (normalmente das 0h às 18h e das 21h às 24h).

Impostos e Tributos:

Valor do ICMS (Imposto na circulação de mercadorias e serviços).

Valor do PIS (Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público).

Valor de COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social).

Ao migrar para o Mercado Livre, o consumidor permanece pagando as parcelas de fio e outros custos das tarifas substituídas para a parcela de energia por um contrato com preços e condições livremente negociadas com o fornecedor de energia escolhido, o que representa

globalmente uma redução nos custos com energia elétrica (CELESC, 2016).

Tarifas e encargos para o cliente livre

Para os clientes livres conectados ao sistema de transmissão, a tarifa a ser paga é a TUST e, aos ligados ao sistema de distribuição, a tarifa é a TUSD. Encargos legais de responsabilidade das geradoras, distribuidoras e transmissoras serão incluídos no TUSD, TUST ou acrescidos no valor negociado no CCVE. Outra possibilidade é ser cobrado no momento da liquidação das transações no mercado de curto prazo da CCEE (ABRACE, 2009).

TUST – Tarifa de Uso do Sistema Elétrico de Transmissão

As Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão – TUST são as remunerações pagas pelos usuários para as prestadoras de serviço público de transmissão. O cálculo da TUST é realizado a partir de simulação do Programa Nodal, que utiliza como dados de entrada a configuração da rede, representada por suas linhas de transmissão, subestações, geração e carga e a Receita Anual Permitida RAP total a ser arrecadada no ciclo. Geradores e demanda devem pagar 50% cada um do RAP do período analisado.

TUSD – Tarifa de Uso do Sistema Elétrico de Distribuição

O TUSD tem como objetivo custear os gastos das distribuidoras. A taxa a ser cobrada dos consumidores livres deve ser proporcional aos seus consumos efetivos (FUGIMOTO, 2010). Algumas normas técnicas de migração para o mercado livre de energia são apresentadas a seguir:

Medição específica: Investimentos necessários para adequar os medidores do consumidor ao padrão especificado pela CCEE. Deve ser instalado um sistema de telemetria para permitir a aquisição remota dos dados de medição pela câmara.

Previsão do consumo e riscos associados: no mercado livre, o consumidor deve ter capacidade de prever seu consumo de energia. Uma previsão inadequada pode fazer com que o consumidor fique subcontratado, deixando-o exposto aos preços de curto prazo. Eventuais sobras de contrato podem ser vendidas no mercado por meio de montantes.

Aporte de garantias: o consumidor livre deve realizar aporte obrigatório de garantias financeiras na CCEE. Exigências nesse sentido também podem ser feitas pelo vendedor da energia.

Participação na CCEE: todo consumidor do mercado livre precisa ser agente da CCEE ou deve ser representado por um comercializador varejista. Essa é uma atividade que requer conhecimentos específicos e prazos rigorosos. Portanto, recomenda-se que os consumidores de menor porte sejam representados por comercializadores varejistas.

Estratégias de contratação

No mercado livre, o consumidor define sua estratégia de contratação de energia e decide a compra. É fundamental que cada consumidor tenha uma estratégia de longo prazo. Apenas a energia contratada protege o consumidor de variações de preços, que apresentam volatilidade no setor elétrico brasileiro.

Essa volatilidade se deve principalmente às características de nosso parque gerador pre-

dominantemente hidroelétrico e, portanto, dependente do regime de chuvas. É importante ressaltar que não existe estratégia melhor ou pior em termos de contratação de energia. Ela deve ser definida com base nas características de consumo de cada empresa e no perfil de aversão ao risco de seus dirigentes. As alternativas mais comuns são apresentadas a seguir:

- A estratégia contempla contratos de longo prazo, que fornecem alta previsibilidade à empresa. Os custos são previamente negociados e conhecidos durante todo o período contratado.

- O mercado de energia oferece oportunidades diferenciadas de compra que podem contribuir para maiores vantagens econômicas, diminuindo os valores pagos pela eletricidade. Uma possibilidade é a contratação de volumes inferiores à necessidade e o complemento do montante total em contratos de curto prazo. Entretanto, o risco associado a esse tipo de estratégia é significativamente superior.

- Os consumidores também podem utilizar mecanismos derivativos de compra futura, opções de compra ou ainda contratos de compra de energia com descontos garantidos em relação à tarifa regulada.

- O contrato pode prever um consumo flexível, como 10% acima ou abaixo do total contratado, reduzindo o risco de déficits ou de superávits. As margens de flexibilidade podem ser precificadas pelos vendedores.

Vantagens e desvantagens do consumidor cativo

As principais vantagens do consumidor cativo é que ele pagará apenas pela energia utilizada, ou seja, gasta por ele e medida pela concessionária.

A desvantagem do consumidor cativo consiste em pagar um valor maior pelo MWh. Essa energia normalmente tem um custo maior do que a energia no mercado livre. Não há nenhuma flexibilidade de preços, condições e reajustes, pois a tarifa é regulada. Não há condições de prever os aumentos das tarifas, pois a tarifa é composta por diversos fatores, somados ainda aos índices de reajustes econômicos.

Vantagens e desvantagens do consumidor livre

Dentre as principais vantagens de aderir ao mercado livre de energia, destacam-se a economia financeira imediata a longo prazo, a flexibilidade de preços, condições e reajustes e a proteção através da compra de energia de longo prazo. O consumidor estará, automaticamente, protegendo-se em relação ao mercado cativo.

O reajuste de seu contrato observará somente os índices econômicos adotados, sem nenhum fator e surpresas, e ainda terá o monitoramento do consumo de energia.

Uma desvantagem do mercado livre de energia é o volume de energia a ser contratado pelo consumidor, que será um montante referente a projeções do seu perfil de consumo, podendo gerar sobras ou faltas de energia que não existem no mercado regulado. Outra desvantagem é que o consumidor contrata a energia, portanto precisará gerenciar mensalmente o próprio consumo, ou ter um custo adicional com a contratação de um agente de mercado para realizar esse processo. Ainda, ele terá o custo com a adequação do sistema de medição (BAGATOLLI, 2012).

Contratos para consumidor livre

Para se tornar um consumidor livre, terá que, no mínimo, assinar três contratos:

CCVE: Contrato de Compra e Venda de Energia Elétrica: estabelecido livremente com um fornecedor de energia (gerador ou comercializador).

CCT e CUST: Contrato de Conexão ao Sistema de Transmissão e Contrato de Uso do Sistema de Transmissão: devem ser firmados com o Operador Nacional do Sistema-ONS, caso o consumidor esteja conectado na rede básica.

CCD e CUSD: Contrato de Conexão ao Sistema de Distribuição e Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (uso do fio): devem ser firmados com a distribuidora local, caso o consumidor esteja conectado na rede de distribuição.

Nesse ambiente de contratação, o consumidor terá gastos com trabalhos adicionais de gestão do contrato do **CCVE**, pois o consumidor passa a ser agente da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica-CCEE e necessita de gerenciamento para realizar a gestão dos contratos (SCARABELOT, 2009).

Consumidor livre convencional

É considerado Consumidor Livre Convencional aquele que tenha exercido a opção de compra de energia elétrica de um fornecedor diferente da concessionária local. Os requisitos para caracterização de um potencial consumidor livre convencional são:

- Possuir demanda contratada igual ou maior a 3000 kW em qualquer horário (ponta ou fora de ponta).

- Estar ligado à rede de distribuição ou de transmissão em nível de tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV.

Para unidades consumidoras ligadas após 07 de julho de 1995, não há restrição do nível de tensão, ou seja, é requisito apenas possuir demanda contratada superior a 3000kW.

- O consumidor livre convencional é representado por segmentos industriais e grandes plantas industriais. Podem compor esse segmento as indústrias: automobilística, alimentícia, siderúrgica, química, dentre outras. O custo energético nesse segmento da indústria contribui de forma importante para o valor da produção e influencia diretamente na competitividade comercial.

A migração de um Consumidor Potencialmente Livre para um Consumidor Livre Convencional acontecerá após:

- Denúncia do Contrato de Fornecimento de Energia Elétrica dentro do prazo estipulado em contrato ou de acordo com a legislação no prazo de 180 dias que antecedem a data de rescisão contratual.

- Adequação do sistema de medição conforme estabelecido nos procedimentos de comercialização.

- Buscar no mercado uma empresa com autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL para a atividade de Comercialização de Energia, a fim de assessoramento na busca da melhor opção em Contrato(s) de Energia Elétrica.

- Buscar no mercado uma empresa com experiência e corpo técnico para desenvolver as atividades de representação junto à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, a gestão do(s) Contrato(s) de Energia Elétrica - CCEE, assim como a gestão do(s) Contrato(s) de Compra e Venda de Energia Elétrica (CPFL, 2016).

Consumidor livre especial

É considerado Consumidor Livre Especial aquele que tenha exercido a opção de compra de energia elétrica de um fornecedor distinto da concessionária local de distribuição, além de ser suprido por fontes renováveis. Os requisitos que caracterizam um potencial consumidor livre especial são:

- Possuir demanda contratada igual ou superior a 500 kW.
- Ser atendido em qualquer nível de tensão.
- Consumidores podem contratar energia de fontes renováveis, ou seja, pequenas centrais hidrelétricas, usina de biomassa e aterros sanitários.
- A contratação de energia proveniente de empreendimentos de fontes renováveis confere o direito à redução de, no mínimo, 50% nas tarifas de uso do sistema de distribuição.

O consumidor livre especial é representado por segmentos industriais e comerciais. Quem compõe esse segmento são: shopping centers, indústrias, redes varejistas, supermercados, setor bancário, dentre outros.

A migração de um Consumidor Potencialmente Livre para um Consumidor Livre Especial deve ser precedida das seguintes providências:

- Denúncia do Contrato de Fornecimento de Energia Elétrica dentro do prazo estipulado em contrato ou de acordo com a legislação no prazo de 180 dias que antecedem a data de rescisão contratual.
- Adequação do sistema de medição conforme estabelecido nos procedimentos de comercialização.
- Busca no mercado de uma empresa com autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL para a atividade de Comercialização de Energia a fim de assessorar na busca da melhor opção em Contrato(s) de Energia Elétrica.
- Busca no mercado de uma empresa com experiência para desenvolver as atividades de representação junto à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica CCEE, assim como a gestão do(s) Contrato(s) de Compra e Venda de Energia Elétrica.

Contrato de compra e venda de energia elétrica – CCVE

No ambiente de contratação livre, o consumidor deve estabelecer, com um agente vendedor de energia, seja uma comercializadora ou um gerador, um contrato de Compra e Venda de Energia – CCVE. Esse contrato pode ser de fontes de energia convencionais ou alternativas (incentivadas).

Energia convencional é caracterizada pelo baixo custo, grande impacto ambiental e tecnologia difundida. Já a energia alternativa é aquela originada como solução para diminuir o impacto ambiental e de tecnologia mais avançada. Essas fontes passaram a ser denominadas fontes incentivadas e o consumidor que contrata essa energia é chamado de consumidor especial.

Energia Convencional

A Usina Hidrelétrica de Energia com potência maior que 30 MW é um tipo de energia concebida a partir da força das águas. Geralmente utiliza um rio para impulsionar as turbinas, além dos desníveis do relevo ou quedas construídas pelo homem. Apesar de aparentemente não ser nociva ao ambiente, a geração de energia a partir de usina hidrelétrica requer a construção

de enormes reservatórios, que represam as águas de um rio de modo que formem quedas, responsáveis por movimentar as turbinas.

Energia incentivada

A PCH (Pequena Central Hidrelétrica) é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW. Além disso, a área do reservatório deve ser inferior a 3 km². Uma PCH típica normalmente opera a fio d'água, ou seja, o reservatório não permite a regularização do fluxo d'água.

Com isso, em ocasiões de estiagem, a vazão disponível pode ser menor do que a capacidade das turbinas, causando ociosidade. Em outras situações, as vazões são maiores do que a capacidade de engolimento das máquinas, permitindo a passagem da água pelo vertedor.

Energia Eólica - A energia eólica é produzida pela transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. A conversão de energia é realizada através de um aerogerador, que consiste em um gerador elétrico acoplado em um eixo que gira através da incidência do vento nas pás da turbina.

Energia da Biomassa - Para produzir a energia da biomassa, é preciso um grande percurso. Um exemplo da biomassa é a lenha que se queima nas lareiras. Hoje falamos em energia biomassa, etanol, biogás e biodiesel.

Energia solar - É a designação dada a qualquer tipo de captação de energia luminosa (e, em certo sentido, da energia térmica) proveniente do Sol. Há posterior transformação dessa energia captada em alguma forma utilizável pelo homem.

Solicitação de modelagens ao sistema CCEE

- A solicitação de modelagem é feita através da Ferramenta SOMA, disponível no espaço exclusivo do site da CCEE.

- Na Ferramenta, o agente deve preencher as principais informações (CUSD/CUST, Instalação Compartilhada, Classe de Atendimento).

- A informação de CUSD deve ser confirmada pelo Agente Conectado (geralmente distribuidora local), assim como a vigência deste.

- O agente de medição deve preencher as informações dos medidores e realizar o cadastro dos pontos de medição no SCDE.

- Ao fim da modelagem, as informações dos ativos estarão disponíveis ao Agente na aba CCEE.

Fator de carga

O Fator de Carga é um índice que permite verificar o quanto que a energia elétrica é utilizada de forma racional. É a razão entre a demanda média durante um determinado intervalo de tempo e a demanda máxima registrada no mesmo período.

Tarifas de energia elétrica

Para que as tarifas sejam aplicadas, os consumidores são divididos em classes de consumo:

Industrial – Unidade consumidora que desempenha atividade industrial.

Comercial – Serviços de transporte, comunicação e telecomunicação e outras atividades.

Residencial – Unidade consumidora residencial.

Rural – Atividades de agropecuária, cooperativa de eletrificação rural, indústria rural, coletividade rural e serviço público de irrigação rural.

Poder público – Atividades dos poderes públicos: Federal, Estadual ou Distrital e Municipal.

Iluminação Pública – Iluminação de ruas, praças, jardins, estradas etc.

Serviço público – Serviços de água, esgoto e saneamento.

Consumo próprio – Fornecimento destinado ao consumo de energia da própria empresa de distribuição.

Componentes da tarifa

A tarifa é composta por dois componentes: a demanda e o consumo de energia. A demanda é a potência média que o consumidor solicita da distribuidora durante um intervalo de 15 minutos. O valor considerado para faturamento é o maior valor registrado no mês.

Já o consumo de energia, medido em kWh ou MWh, é a potência elétrica disponibilizada no tempo, neste caso o mês de consumo (30 ou 31 dias ou calendário de faturamento da distribuidora).

Estrutura tarifária

No Brasil, as tarifas de energia elétrica estão estruturadas em dois grandes grupos: Grupo A - foco do trabalho, pois nele estão inseridos os consumidores de alta tensão, e o Grupo B - consumidores residenciais.

Grupo A

Os consumidores atendidos entre 2,3 kV – 230 kV pertencem ao grupo A. Eles são atendidos pela rede de alta tensão e as tarifas são estruturadas em três modalidades distintas: convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde.

Convencional

O valor cobrado pelo consumo de energia e demanda não depende das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. Na estrutura tarifária convencional, a tarifa apresenta um valor para o consumo em R\$/MWh e um valor em R\$/kW para a demanda de potência.

Assim, o consumidor paga o mesmo valor pela demanda e pela energia consumida em qualquer hora do dia e período do ano, mas o consumidor deverá ser atendido com tensão de fornecimento abaixo de 69 kV e possuir uma demanda contratada menor que 300 kW para poder entrar na estrutura tarifária.

Horo-Sazonal Azul

A aplicação da tarifa é diferenciada quanto às horas de utilização do dia e período do ano. As tarifas são diferenciadas para a demanda de potência de acordo com as horas de utili-

zação do dia e diferenciadas no período do ano em relação ao consumo de energia. Existe uma tarifa dependendo das horas ou períodos do ano, tanto para demanda como para energia. Ainda, os consumidores terão que estar conectados com uma tensão de fornecimento maior ou igual a 69 kV.

Horo-Sazonal Verde

Nessa estrutura, as tarifas são aplicadas com valores diferenciados para os períodos do ano e uma única tarifa para a demanda de potência, não existindo diferenciação entre demanda de ponta e demanda fora de ponta. Existe uma só tarifa para demanda, diferentemente da horo-sazonal azul.

Grupo B

No grupo B de tarifas, os consumidores estão classificados em classes de consumo para unidades consumidoras com fornecimento de tensão inferior a 2,3 kV. As classes de consumo são as seguintes:

- B1 – Classe residencial.
- B2 – Classe rural.
- B3 – Outras classes.
- B4 – Classe iluminação pública.

Quem pertence ao grupo B paga somente um preço já estabelecido, sendo que o custo de demanda de potência está incorporado ao custo de fornecimento de energia.

Composição das tarifas

O preço das tarifas que a concessionária cobra pelo serviço prestado está dividido em duas partes:

- Parcela 1:** custos gerenciáveis.
- Parcela 2:** custos não gerenciáveis.

Custos gerenciáveis

Nessa parcela, a concessionária tem capacidade de administrar os gastos gerados, tais como mão de obra qualificada, o uso de material ou outras atividades que envolvem a manutenção e a operação de distribuição de energia.

- Despesas de operação e manutenção (Pessoal, Material, outros).
- Despesas de capital (cotas de depreciação, remuneração de capital).
- Outros (P&D, PIS/COFINS).

Custos não gerenciáveis

Nessa parcela, a concessionária não tem capacidade de administrar diretamente os gastos. Seus valores não dependem do controle da empresa, como encargos e tributos fixados legalmente.

- Encargos setoriais (RGR, CCC, TFSEE, CDE e rateio de custos de Proinfra).
- Encargos de transmissão.

- Compra de energia elétrica para revenda.

Atualização das tarifas

No Brasil, existem três tipos de reajustes que acontecem no preço cobrado anualmente pelo uso do sistema:

Reajuste tarifário anual

Reajustar o preço da compra de energia obtida pelas concessionárias anualmente é o objetivo do reajuste tarifário anual. Devemos levar em consideração as duas parcelas que compõem as tarifas de energia, custos gerenciáveis e os custos não gerenciáveis. O período de reajuste, como o próprio nome já diz, é de 12 meses. Logo, a cada 12 meses, o índice de reajuste é calculado e as tarifas são reajustadas de acordo com o índice obtido.

Tarifa periódica

A tarifa periódica tem como principal objetivo analisar o equilíbrio econômico financeiro da concessão concebida para a concessionária. O período de análise é definido no contrato de concessão e geralmente é de quatro anos.

O cálculo da revisão baseia-se em dois princípios. O reposicionamento tarifário e o cálculo do fator x.

Reposicionamento tarifário: O cálculo se baseia na definição da parcela da receita necessária para cobertura dos custos operacionais eficientes para um dado nível de qualidade do serviço. Essa definição, da parcela da receita necessária para cobertura, é um dos grandes desafios da revisão tarifária periódica. Para essa definição, a ANEEL vem adotando uma abordagem cujo enfoque metodológico é denominado Empresa de Referência. É a simulação de uma empresa virtual responsável que presta serviço de fornecimento de energia em condições de eficiência e adaptação econômica ao ambiente no qual desenvolve sua atividade (SCARABELOT, 2009, p. 21).

Cálculo do Fator X: O fator X está relacionado às metas estabelecidas de eficiência para o período tarifário. Reflete os ganhos de produtividade esperados na área de concessão, a avaliação dos consumidores sobre a distribuidora (índice de satisfação do consumidor IASC) e reajuste do componente “pessoal” (SCARABELOT, 2009, p. 21).

Revisão tarifária extraordinária

No contrato de concessão também está inserido o mecanismo de revisão extraordinária. A ANEEL poderá, a qualquer momento, proceder a revisão das tarifas por solicitação da empresa de distribuição. É necessária a comprovação por parte da empresa de distribuição e alterações significativas nos custos de distribuição.

Tributo e imposto nas faturas de energia elétrica

As distribuidoras de energia elétrica cobram pelos serviços prestados de distribuição de energia através de faturas de energia elétrica emitidas mensalmente. Nas faturas estão embuti-

dos, além dos custos com o uso do sistema de distribuição e gastos com o consumo de energia (caso o cliente seja cativo), tributos como o PIS/PASEP e COFINS, imposto de ICMS e a contribuição para custeio do serviço de iluminação pública.

ICMS: Imposto em operações relativas à circulação de mercadorias e à prestação de serviços de transporte interestadual, intermunicipal e de comunicação. Cada estado possui uma tabela de valores.

PIS/PASEP e COFINS: São dois tributos federais. O PIS/PASEP tem como finalidade o financiamento do programa do seguro-desemprego e o abono aos empregados que recebem até dois salários mínimos mensais. A COFINS (Contribuição Social para Financiamento da Seguridade Social) é destinada a financiar as despesas das áreas de saúde, previdência e assistência social. Eles sofrem alterações mensais que são divulgadas pelas distribuidoras.

Iluminação pública: Contribuição para custeio do serviço de iluminação pública, convênio celebrado entre as prefeituras e a distribuidora. Tem o objetivo de promover a arrecadação da contribuição nas contas de energia elétrica, nos termos das leis municipais de cada prefeitura. O valor faturado será repassado integralmente às respectivas prefeituras.

Leilões de energia convencional e fontes alternativas

Os leilões são a única forma de acesso à compra de energia elétrica pelas distribuidoras, que participam desse mercado exclusivamente por meio do ACR. A demanda por energia é estimada pelas distribuidoras, que precisam garantir o atendimento à totalidade dos mercados cativos de energia.

Os vencedores dos leilões são definidos pelo critério de menor tarifa, vencendo o leilão que ofertar energia elétrica pelo menor preço por MWh para atendimento da demanda prevista pelas distribuidoras (EPE, 2011).

Bandeiras tarifárias

As bandeiras tarifárias indicam a diferença de custo de geração de energia para os consumidores. Para facilitar a compreensão das bandeiras tarifárias, 2013 foi um ano de teste com caráter educativo. A fim de que os consumidores se familiarizassem com o sistema, a ANEEL divulgou mês a mês as bandeiras que estariam em funcionamento.

A partir de 1º de janeiro de 2015, as bandeiras começaram a valer em todos os estados onde vigoram. De janeiro a dezembro (2015), tivemos bandeira vermelha. Em agosto de 2016, a bandeira tarifária foi a verde.

O sistema possui três bandeiras: verde, amarela e vermelha. Indicam se a energia custa mais ou menos em função das condições de geração de eletricidade.

Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo.

Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,020 para cada quilowatt-hora (kWh) consumido.

Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,030 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,035 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

As bandeiras tarifárias são uma forma diferente de apresentar um custo já existente na conta de energia, mas não devidamente informado. Os custos com compra de energia pelas distribuidoras são incluídos no cálculo de reajuste das tarifas e são repassados aos consumidores

um ano depois de ocorridos, quando a tarifa reajustada passa a valer.

Com as bandeiras, haverá a sinalização mensal do custo de geração da energia elétrica, que será cobrada do consumidor com acréscimo das bandeiras amarela e vermelha.

Uma vez por mês, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) calcula o CMO e, com essas informações, a ANEEL aciona a bandeira tarifária que estará vigente no mês seguinte.

Precificação

No mercado livre de energia, o consumidor paga pela energia um preço firmado em contrato bilateral com um agente vendedor. Esse preço é definido para cada período de suprimento e reajustado, normalmente, a cada um ano.

Sendo assim, o consumidor já sabe o valor que pagará por R\$/MWh nos próximos anos, considerando um ambiente com inflação controlada. Esse preço, com raras exceções, é mais vantajoso do que a tarifa que seria paga caso o consumidor estivesse sendo atendido pela concessionária local (mercado cativo).

Modelo de precificação no ACL

A fatura recebida mensalmente pelo consumidor no ambiente de contratação livre é composta pelo valor da fatura de energia emitida pelo vendedor, pela fatura do TUSD, pela fatura emitida pelos encargos do setor e a contribuição financeira para a CCEE.

Fatura de energia: O consumidor recebe uma fatura emitida pelo seu fornecedor de energia, seja ele comercializador ou gerador. O valor da fatura é o resultado do preço de contrato firmado e o volume de energia gasto naquele mês. Esse valor é cobrado conforme o contrato realizado entre consumidor e comercializador.

Garantia Financeira: Todo contrato de energia elétrica no mercado livre exige a apresentação de uma garantia financeira, como garantia do cumprimento de suas obrigações. Essa garantia deve ser apresentada até um mês após começar o uso do sistema.

Fatura TUSD: O consumidor recebe mensalmente uma fatura referente ao custo com o uso do sistema de distribuição. Nela estão calculados os valores que o consumidor terá que pagar por utilizar o sistema da distribuidora para transportar a sua energia consumida. Nessa fatura, o consumidor só tem gastos referentes à utilização do sistema de distribuição.

Encargos e Contribuição CCEE: Mensalmente, o consumidor recebe, via boleto bancário, uma conta a ser paga pelos custos que a câmara de comercialização tem, referente ao gerenciamento dos agentes participantes. O valor da contribuição é insignificante em relação aos valores das faturas de energia e da TUSD. Existe também uma fatura referente a encargos do setor elétrico.

Aporte de garantia financeira CCEE: Mensalmente, a câmara realiza um cálculo para verificar o valor a ser pago pelo consumidor referente à garantia financeira. O cálculo leva em conta o volume de contratos que o consumidor tem firmado em um tempo de cinco meses futuros e a previsão de carga para esses meses. Esse valor, depois de apurado, deve ser pago em uma conta bancária e servirá de garantia caso alguma inadimplência ocorra (SCARABELOT, 2009).

Preço de liquidação das diferenças (PLD)

O PLD significa o preço pela liquidação das diferenças, sendo informado pela CCEE. A

formação destes é gerada pelos dados recebidos pelo operador nacional do sistema, que busca sempre a melhor forma de aproveitar e otimizar o uso do sistema interligado.

O cálculo leva em consideração o objetivo de melhor utilização da água para a geração de hidroelétricas e com base nas condições hidrológicas apresentadas, na demanda de energia consumida no custo do déficit, em novos projetos e na disponibilidade de novos equipamentos de geração e transmissão. Com o resultado deste estudo, obtemos os custos marginais de operação, os chamados CMO, para cada patamar de carga e para cada submercado (ARNHOLD, 2012).

Fator de potência

O fator de potência identifica ou fornece uma noção dos excedentes para as empresas que geram, por cima do adicional, cobranças extras por uso de energia reativa. Assim, publicações técnicas demonstram que o fator de potência é um dos principais itens relacionados à utilização racional de energia.

Material e método

Para a execução do presente trabalho, a metodologia utilizada foi o estudo de caso. As estratégias a serem analisadas no trabalho são aquelas que se diferenciam das convencionais e que apresentam resultados particulares quando aplicadas no mercado livre de energia.

Outros métodos serão aplicados, tais como a revisão da literatura em diversos segmentos e pesquisas documentais com método experimental de avaliação de vantagens do mercado livre de energia. Esses dados são coletados através de natureza documental e bibliográfica, em sites, documentários, livros e dissertações sobre o assunto em questão.

As análises são feitas de forma teórica, baseadas em comparações entre estudos de diversos autores. Tais análises têm o objetivo de identificar diferenças entre resultados que apontam para estratégias específicas, que possam ser implementadas em um Mercado Livre de Energia, gerando resultados diferenciados. De posse desses resultados, será levada em consideração a aplicabilidade das estratégias no país.

Resultados e discussão

Este projeto foi desenvolvido no intuito de reduzir custos de energia elétrica através do mercado livre de energia, tendo como objetivo a implementação do mercado na empresa. Considera-se apenas o cliente do grupo de tensão A4.

É de grande importância uma análise sobre os fatores que envolvem a contabilização de gastos com o consumo de energia elétrica. Assim, uma comparação entre os mercados será elaborada.

Esse consumidor está inserido em um ambiente de contratação regulado, o qual paga pelo seu consumo de energia em uma fatura emitida pela distribuidora. A fatura é emitida mensalmente, na qual estão incluídas as tarifas de energia reguladas pela ANEEL.

Os consumidores estão divididos em classes de tensão de fornecimento. Assim, as tarifas são diferentes para cada caso e de acordo com a classificação do consumidor. A metodologia que será discutida baseia-se em uma simulação em um período de 12 meses.

Para realizar uma simulação, são necessárias as últimas faturas de energia. Delas, serão extraídas algumas variáveis, para então realizar a projeção de um custo anual de economia.

Dentre as diversas variáveis, temos:

- Classe de consumo.
- Distribuidora.
- Demanda contratada.
- Consumo anual.
- ICMS.
- Modalidade tarifária.

Após a coleta desses dados, devemos procurar quais tarifas estão em vigência de acordo com a classificação tarifária e da distribuidora local de fornecimento. As tarifas que englobam a fatura de energia de um consumidor cativo são:

- Custo de demanda contratada.
- Custo de energia.
- Custo relacionado com PIS/COFINS.

Para o mercado livre, será baseada uma simulação dos custos pertinentes ao mercado, tais como:

- Custo com o uso do sistema de distribuição.
- Custo com o contrato de energia.
- Encargos CCEE.
- Custo relacionado ao PIS/COFINS.

Neste estudo, será analisada a empresa industrial do ramo têxtil *Albany International Corp*, pertencente à classe de tensão do subgrupo A4. Os dados analisados são os seguintes:

- Classe: Industrial.
- Grupo tarifário: A4 Horo-Sazonal Azul.
- Distribuidora: Celesc.
- Demanda contratada ponta: 1800 kW.
- Demanda contratada F. Ponta: 2000 kW.

Apresentamos o consumo anual de energia obtido das faturas de energia elétrica, objetivando o consumo anual.

Tabela 1. Consumo em 12 meses

Meses do ano	Consumo na ponta (Kw)	Consumo fora de ponta (Kw)
jan/17	70,82	462,56
fev/17	72,58	605,64
mar/17	69,58	582,65
abr/17	67,63	702,64
mai/17	63,89	608,69
jun/17	75,8	600,08
jul/17	69,3	402,65
ago/17	61,4	692,66
set/17	68,74	663,37
out/17	66,35	703,41
nov/17	63,33	700,02
dez/17	58,96	389,4
Consumo anual	808,38	7113,77

Fonte: Os autores.

O consumo total anual no período foi: consumo ponta 808,38MWh e o consumo fora de ponta 7113,77 MWh.

Da fatura, também 25% do ICMS recolhido no valor da fatura. O PIS/COFINS foi utilizado, sendo 6,47%, e o preço de contrato de energia incentivada de 165mwh. Valores estes atualizados e retirados do site da CELESC.

1º simulação de gasto anual da empresa no mercado cativo

Para simular os gastos anuais da empresa no ambiente cativo, foi necessário conhecer as tarifas vigentes de demanda de energia. Essas tarifas podem ser coletadas no site da ANEEL.

Tabela 2. Tarifas vigentes em 2016

Tarifas horario azul (celesc)	
Demanda	R\$/Kw
Demanda na ponta	28,88
Demanda fora de ponta	12,65
Energia	R\$/MWh
Energia na ponta seca	296,08
Energia fora de ponta seca	182,4
Energia na ponta umida	272,01
Energia fora de ponta umida	169,7

Fonte: Os autores.

A sequência mostra os cálculos das tarifas de energia, o cálculo da tarifa da energia na ponta – EP e energia fora de ponta – EFP.

$$\text{Tarifa EP} = [(5*272,01+7*296,08) /12] = 286,05$$

$$\text{Tarifa EFP} = [(5*169,7 +7*182,4) /12] = 177,10$$

Cálculo PIS/COFINS

$$\text{PIS/COFINS} = [(DP+DFP+EP+EFP) / (1-25\%-6,47\%)]*6,47\%$$

Aqui, são simulados os gastos com demanda na ponta (DP) e fora de ponta (DFP), energia no horário de ponta (EP), energia fora de ponta (EFP) e seus tributos PIS/COFINS.

Tabela 3. Projeção de gastos da empresa no mercado cativo

Gasto anual mercado cativo				
Classificação	Quantidade	Tarifa	Meses	Total R\$
DP(Kw)	1800	28,88	12	623.808
DFP(Kw)	2000	12,65	12	303.600
EP(MWh)	808,38	286,05	-	231.237
EFP(MWh)	7113,77	177,1	-	1.259.848
PIS/COFINS	-	6,47%	-	190.603
			Total	2.609.096

Fonte: Os autores.

Assim, o gasto anual da empresa no mercado cativo fica mais ou menos R\$ 2.609.096, considerando apenas os tributos PIS/COFINS.

2º simulação da empresa no mercado livre com um contrato de energia incentivada

A seguir, apresentamos as tarifas vigentes da empresa no mercado livre com um desconto de 50% na tarifa do TUSD de demanda.

Tabela 4. Tarifas mercado livre e energia incentivada

Tarifas CELESC TUSD	
Demanda com 50% desconto	R\$(kw)
TUSD demanda na ponta	16,45
TUSD demanda fora de ponta	6,48
Encargo	R\$(MWh)
TUSD encargo na ponta	28,02
TUSD encargo fora de ponta	28,02

Fonte: Os autores.

São simulados os gastos com TUSD na ponta, TUSD fora de ponta, TUSD encargo na ponta, TUSD encargo fora de ponta, energia contratada com perdas de 3% da rede de distribuição básica (contrato) e tributo PIS/COFINS.

O preço de R\$ 169,87 (MW/h) é o preço médio hoje no mercado para um contrato de energia incentivada. A seguir, veremos uma projeção do gasto que a empresa teria no mercado livre com um contrato de energia incentivada.

Tabela 5. Gasto anual mercado livre

Gasto anual mercado livre				
Tarifas	Quantidade	Tarifa R\$	Meses	Total R\$
TUSD P	1800	16,45	12	355,32
TUSD F.P	2000	6,48	12	155,57
TUSD E.P	808,38	28,02	-	22.650,80
TUSD E.F.P	7113,77	28,02	-	199.327,83
Contrato	10.808,34	169,87	-	1.836.012,71
PIS/ COFINS	-	6,47%	-	57.603,48
			Total	2.115.594,82

Fonte: Os autores.

Assim, o gasto anual simulado no mercado livre, considerando um contrato de energia com fonte de energia incentivada e apenas o tributo de PIS/COFINS inserido, seria de R\$ 2.115.594,82.

3º Comparação dos gastos anuais da empresa no mercado cativo x mercado livre

Depois de concluirmos as etapas de simulação de contratos e ambientes regulados e livres, veremos uma comparação de economia que a empresa teria se estivesse no mercado livre.

Tabela 6. Economia com o mercado livre

Variáveis	Comparação entre mercados	
	Cativo R\$	Livre Incentivada R\$
Gasto anual	2.609.096,00	2.115.594,48
Economia R\$	493.505,52	
Economia %	18,91%	

Fonte: Os autores.

Ao fim dessa simulação, nota-se que há uma vantagem financeira na migração para o mercado livre de energia. Nota-se que um contrato de energia de fonte incentivada é 18,91% mais lucrativo.

O estudo mostrou que a empresa poderia ter um lucro de energia anual de mais ou menos R\$ 494 mil se comparado com o cativo. Assim, considerando o gasto de adequação do sistema de medição (SMF) da empresa, que geraria um total de R\$ 80 mil para se adequar às normas, a empresa teria um retorno após seis a sete meses no sistema.

Caso a previsão de aumento da carga seja diferente ao longo dos próximos anos, há necessidade de um novo estudo para então reduzir ou aumentar os volumes a serem contratados.

O novo setor elétrico brasileiro vem sofrendo grande pressão de todos os lados do sistema. O consumidor tem em mente que os preços com energia elétrica estão cada vez mais elevados e estão insatisfeitos com desligamentos e interrupções do fornecimento de energia, além da

qualidade do atendimento prestado.

Órgãos regulamentadores fazem severas fiscalizações em relação à eficiência do serviço prestado, além deles realizarem constantes mudanças nas regulamentações vigentes.

Os governos pressionados por consumidores devem mostrar melhor qualidade e redução das tarifas de energia elétrica. Ainda, exigem garantia de investimento para depositarem fundos, que serão utilizados para criação e evolução do sistema.

Por fim, os grandes investidores do setor, movidos pelos históricos de boa performance e estabilidade, criam grandes expectativas de retorno de seus investimentos feitos no setor elétrico.

Diante das situações, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias por parte de empresas do setor elétrico brasileiro. Além das já conhecidas estratégias adotadas em leilões, as empresas ligadas ao mercado livre de energia apresentam oportunidades para o desenvolvimento de novas estratégias.

Uma estratégia que vem sendo colocada em prática em outros mercados é um reajuste na classificação dos consumidores, com o objetivo de obter mais facilmente informações que contribuam para os ajustes de tarifas.

A implementação de estratégias objetiva corrigir a classificação dos consumidores utilizada por empresas que fazem a análise, a qual classifica os consumidores se baseando em parâmetros comerciais.

Na busca para a implementação de estratégias que gerem ganhos em grandes escalas, há a possibilidade da junção ou criação de parcerias com empresas financeiras, com o intuito de expansão na exploração e esforços gerados pela cooperação de dois diferentes setores. Os grandes beneficiados pela parceria são:

- Funcionários que prestam suporte para os negócios e que são mais atraídos pelo mercado de energia do que pelo mercado financeiro, devido à grande exposição pessoal, considerando os salários e a localização.

- Investimentos poderão ser realizados internamente com o dinheiro proveniente da própria empresa.

- O crescimento financeiro pode ser utilizado para financiar a otimização da eficiência, como a capacidade que a empresa de energia tem em tomar decisões mais acertáveis em leilões de energia no mercado desregulado.

- A incidência de um número maior de clientes do setor elétrico influenciada pela capacidade de expansão de negócios.

Os consumidores brasileiros possuem o direito de participar ativamente do mercado livre. Muitos consumidores já se arriscam no mercado de comercialização de energia, além da necessidade de análise de preços e contratos oferecidos pelos comercializadores de energia.

Há, ainda, o estudo de estratégias a serem seguidas em lances de leilões para concepção de contratos e uma prática que consiste na formação de alianças cooperativas entre os próprios consumidores. Essa estratégia tem como principal objetivo aumentar o poder de compra dos consumidores residenciais e industriais frente aos comercializadores.

A variação do preço da energia é o principal risco que o consumidor pode ter ao optar por comprar energia no mercado livre, pois, em um determinado período seco (ausência de chuva nos reservatórios das usinas), o preço pode ficar superior àqueles compatíveis com suas expectativas. Nesses momentos, a necessidade de se manter o ritmo da produção pode significar aumento desproporcional nas despesas com energia.

Uma alternativa é obter informações suficientes para entender a flutuação do preço e realizar cotações de preços junto aos comercializadores, havendo negociações de curto ou longo prazo com preços e reajustes predeterminados. A segunda alternativa é o consumidor encontrar

no mercado uma empresa que assuma o risco da variação de preço em seu lugar.

Conclusões

Atualmente, existem duas formas de adquirir energia para um consumidor livre: a energia convencional e a energia incentivada. A convencional destina-se apenas para os consumidores que tenham uma demanda contratada maior ou igual a 3000 kW e a energia incentivada para consumidores especiais com demanda maior ou igual a 500 kW. Qualquer consumidor que queira entrar no mercado livre de energia terá que ter no mínimo 500 kW de demanda contratada.

Quanto à qualidade de energia e à segurança de oferta, os dois mercados não possuem diferença alguma. O consumidor livre paga às distribuidoras o acesso e uso para transporte da energia em suas redes, em valores que são equivalentes aos já pagos pelo consumidor cativo. A diferença, então, está na compra da energia.

O estudo do mercado possibilitou visualizar que o mercado livre tem sua estrutura de custos mais complexa do que o mercado cativo, pois o mercado livre possui diversas tarifas a serem pagas, ao contrário do mercado cativo.

Após este estudo, a viabilidade econômica de migração ao mercado livre mostrou-se vantajosa, porém outros fatores, além do ganho financeiro, devem ser levados em consideração, como a importância da energia para seu processo produtivo, qual o valor da energia quando comparada ao cativo, a elasticidade e a flexibilidade do seu consumo etc. Assim, é de extrema importância saber avaliar o perfil de consumidor a ser seguido.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL**. 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/transmissao5/>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

ARNHOLD, Fernando Sossmeier. **A formação de preço das diferenças e o impacto da volatilidade do cálculo das garantias financeiras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia Elétrica, Rio Grande do Sul, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GRANDES CONSUMIDORES INDUSTRIAIS DE ENERGIA E CONSUMIDORES LIVRES. **ABRACE**. 2009. Disponível em: <<http://www.abrace.org.br>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZANTES DE ENERGIA. **ABRACEEL**. 2011. Disponível em: <<http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

BAGATTOLI, Sandro Geraldo. **Gestão estratégica de energia elétrica**. Mercado de energia. 1. ed. Blumenau, 2012.

BRASIL. **Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <<https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/109916/decreto-5163-04>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

_____. **Lei nº 8.631, de 4 de março de 1993.** Dispõe sobre a fixação dos níveis das tarifas para o serviço público de energia elétrica, extingue o regime de remuneração garantida e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/LEIS/L8631.htm>. Acesso em: 17 ago. 2018.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **CCEE.** 2010. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que_fazemos?_afLop=460942319566980/>. Acesso em: 22 jul. 2017.

DISTRIBUIÇÃO E GERAÇÃO. **CELESC.** 2016. Disponível em: <<http://www.celesc.com.br/portal/index.php/celesc-distribuicao>>. Acesso em: 5 out. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **EPE.** 2011. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/paginas/default>>. Acesso em: 7 ago. 2017.

EMPRESA ENERGÉTICA. **COMERC.** 2009. Disponível em: <<https://www.comerc.com.br/comerc/default.asp>>. Acesso em: 2 set. 2017.

_____. **CPFL.** 2016. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/institucional/consumidor/livre>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

FUGIMOTO, Sérgio Kinya. **Estrutura de tarifas de energia elétrica – análise crítica e proposições metodológicas.** São Paulo, 2010.

NERY, Eduardo. **Mercados e regulação de energia elétrica.** 1. ed. São Paulo: Editora Inter ciência, 2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **ONS.** 2009. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons/>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

SCARABELOT, Álvaro Garske. **Ferramenta de apoio à tomada de decisão de migração ao mercado livre para consumidores potencialmente livres.** 2009. 81f. Projeto de diplomação – Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL OBJETIVANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Development of residential automation application for energy efficiency

Jackson Diego Campestrini ¹
Julia Grasiela Busarello Wolff ²

Resumo: A preocupação com o meio ambiente não se resume apenas a salvar florestas e reduzir o desperdício de água. Questões mundiais que geram grandes discussões envolvem o consumo de energia e a busca por fontes renováveis mais baratas e menos agressivas ao planeta. Um fator relevante que impulsiona essa nova busca são os desperdícios de energia elétrica descontrolados que vêm acontecendo no decorrer dos anos pelas residências. O conceito de “stand by”, que deveria ser uma comodidade a todos, por ser algo prático e acessível, se tornou um grande vilão no consumo de energia elétrica. Uma simples indicação de equipamento ligado é responsável por quase 15% do valor da fatura de energia elétrica. A comodidade de poder sair de casa sem desligar os equipamentos se torna inviável quando somados os seus gastos, sem contar o risco de sofrer uma sobrecarga e danificá-los. O sistema de automação em eficiência energética apresenta grande potencial comercial e, também, potencial para evitar grande parte dos gastos desnecessários.

Palavras-chave: Automação. Eficiência. Tecnologia.

Abstract: Concern for the environment is not just about saving forests and reducing water waste. A global issue that generates great discussions is the consumption of energy and the search for cheaper and less aggressive renewable sources to the planet. A relevant factor that drives this new search. They are the waste of uncontrolled electrical energy that has been happening over the years by the residences. The concept of “stand by”, which should be a convenience to all, for if something practical and affordable, has become a major villain in the consumption of electricity. A simple indication of connected equipment accounts for almost 15% of the value of the electric bill. The convenience of being able to leave the house without turning off the equipment becomes unfeasible when added to your expenses, without counting the risk of suffering an overload and damaging them. The automation system in energy efficiency has great commercial potential and potential to avoid much of the unnecessary expenses.

Keywords: Automation. Efficiency. Technology.

Introdução

Atualmente, temos tido um alto consumo de energia elétrica nas residências e, muitas vezes, os gastos poderiam ser reduzidos caso fossem realizados diversos monitoramentos e controle de toda a energia gasta em tempo real.

Há o intuito de propiciar um novo rumo para as residências autônomas, incluindo a moderna tendência de mercado, conhecida como *Internet of Things* – IoT, ou seja, a “internet das coisas”, que consiste em uma rede de objetos físicos, veículos, prédios, os quais possuem tecnologia embarcada, sensores e conexão com a rede, capazes de coletar e transmitir dados.

A “internet das coisas” é uma extensão da internet atual, fornecendo, aos objetos do cotidiano, a opção de poderem ser conectados à internet, com capacidade de comunicação entre os equipamentos da residência e um smartphone, a fim de podermos viabilizar o acompanhamento do consumo energético diário.

A conexão com a rede mundial de computadores viabilizará, em primeiro lugar, con-

^{1, 2} Centro Universitário Leonardo Da Vinci – UNIASSELVI – Rodovia BR 470 – Km 71 – nº 1.040 – Bairro Benedito – Caixa Postal 191 – 89130-000 – Indaial/SC. Fone (47) 3281-9000 – Fax (47)3281-9090 E-mail: jacksoncampestrini@hotmail.com; julia.wolff@uniasselvi.com.br.

trolar remotamente os objetos e, em segundo lugar, permitirá que os próprios objetos sejam acessados como provedores de serviços. O que todos têm em comum, além dessa tecnologia, é a energia que necessitam para o funcionamento.

A tecnologia e a energia elétrica dentro de uma residência, ou até mesmo em uma empresa, se tornariam energeticamente mais eficientes, diminuindo o consumo de energia elétrica (FORBES, 2014).

Alguns países estão direcionando os seus esforços para conscientizarem a população com relação aos eletroeletrônicos. Os aparelhos, mesmo não estando em uso, ainda consomem energia por estarem conectados na tomada, no modo stand by, o que significa que há corrente elétrica passando pelo circuito do equipamento. O crescente aumento do consumo de energia elétrica e sua utilização de maneira sustentável têm sido temas para discussões e acordos em níveis nacionais e internacionais.

É verdade que são enfrentados inúmeros desafios para, assim, garantir um desenvolvimento embasado em medidas que contemplem o abastecimento energético sustentável, otimizando o uso dos recursos naturais. De tal maneira, a eficiência energética é apresentada como uma das soluções que agregam mais benefícios, tanto ambientais como econômicos e sociais (PROCEL, 2008).

A eficiência no uso da energia, principalmente a energia elétrica, está em pauta desde os choques do petróleo na década de 70. Foi possível verificar que as reservas fósseis não teriam seus preços sempre fixos, tampouco o seu uso ocorreria sem prejuízos ao meio ambiente (EPE, 2011).

Assim, o governo brasileiro, em 30 de dezembro de 1985, criou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás, com o propósito de promover o uso racional e eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício (PROCEL, 2012).

No ano de 2001, o país passou por uma crise de abastecimento no setor elétrico. Através da forte participação da sociedade na busca da solução e da valorização de eficiência no uso de energia, teve que cortar seu consumo de eletricidade em 20%. Caso não ocorresse, sofreria um aumento no valor de sua conta mensal de energia.

Segundo tal medida, o usuário que consumisse até 100 quilowatts/hora por mês (30% dos lares brasileiros) não precisaria realizar tal economia. Já acima dessa faixa, a redução era obrigatória e os que não aderissem ao plano corriam o risco de ter o fornecimento de energia cancelado por três dias na primeira infração e seis dias em caso de reincidência.

O governo ainda impôs uma sobretaxa às contas de energia que fossem superiores a 200 kWh por mês, pagando 50% a mais caso o patamar fosse excedido. Haveria uma segunda sobretaxa, de 200%, para as contas acima de 500 kWh.

Em 2011, também houve a criação da certificação de gestão energética, a ISO 50001, mostrando, assim, que entidades de todo o mundo estavam se unindo para combater o desperdício de energia e promover o uso eficiente e racional desse insumo.

A eficiência energética em uma edificação residencial acontece através da introdução de novas tecnologias, incentivo à mudança de hábito do próprio consumidor em relação ao seu consumo de energia através dos programas e políticas de conservação e uso racional de energia, como o Programa Brasileiro de Etiquetagem.

Esse programa tem por objetivo informar aos consumidores o quanto determinado eletrodoméstico consome de energia elétrica, qual a sua relação de eficiência (mais eficiente ou menos eficiente), possibilitando uma economia com os custos gerados de sua utilização.

O dimensionamento correto dos circuitos elétricos sugere que, quanto mais próximo da tensão de operação do equipamento, melhor será o rendimento deste. Nas instalações elétricas,

uma das maiores dificuldades da atualidade é a questão da eficiência energética. Os problemas mais gerais globais, como o aquecimento da atmosfera terrestre e as questões econômicas, sempre estiveram presentes na sociedade humana.

Resolver problemas dessa natureza significa propor formas de ação e técnicas para limitar o consumo, reduzir perdas e reduzir a demanda das fontes remuneradas de suprimento de energia, sem onerar em demasia os custos finais da instalação (CABRAL, 2000).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar que para um projeto de instalação elétrica, bem como em qualquer projeto de engenharia, é preciso identificar muito bem o problema a ser resolvido, a fim de propor e desenvolver uma solução exequível.

Neste trabalho, será realizada a implementação de um sistema de automação em uma residência para o controle de gastos com energia elétrica, e será possível saber até mesmo o valor da fatura de energia, antes mesmo dela ter sido gerada e enviada à residência.

O próprio sistema irá monitorar o consumo da residência e enviará informações ao celular cadastrado. Com isso, podemos evitar gastos desnecessários quando não houver ninguém na residência, desligando as fases dos equipamentos que ficam conectadas diretamente às tomadas.

Os equipamentos, mesmo estando em modo de espera, estão consumindo energia, mas a diferença gerada no consumo de energia, muitas vezes, não é vista pelo consumidor. Ao somarmos todo o consumo residencial ao longo de um período, o valor se torna muito mais significativo e, se for multiplicado por todas as residências de uma cidade, estado ou país, temos como resultado um grande desperdício energético.

Consumir energia de maneira racional e eficiente significa evitar desperdícios de energia, sem prejudicar o nível de conforto e a qualidade de vida do usuário. O próprio aplicativo proposto pelos autores realiza o controle do consumo energético e terá o modo autônomo, no qual o proprietário poderá deixar a casa operando somente com a energia necessária para cada momento do dia, incluindo, também, a função de controle de luminosidade das lâmpadas instaladas na residência.

Estado da arte

A eletricidade é uma das formas de energia mais importantes para a sociedade moderna, é indispensável ao progresso, garantindo, além da produção de bens e serviços, o convívio social dentro dos padrões modernos praticados (BOA NOVA, 1985).

História da energia elétrica

Desde os primórdios, quando o homem aprendeu a usar o fogo como fonte de calor e luz, a ciência evoluiu muito até chegar na energia elétrica. Durante o século XIX, surgiram as lâmparas de azeite e de óleo, que evoluíram para lâmpadas de acetileno.

Já em 1831, tanto Michael Faraday, no Reino Unido, como Joseph Henry, nos Estados Unidos, demonstraram, cada um com seu modo, mas ao mesmo tempo, a possibilidade de transformar energia mecânica em energia elétrica.

O gerador de Faraday produzia corrente contínua a partir de um disco de cobre, que girava no campo magnético formado pelos polos de um ímã de ferradura. Henry obteve corrente alternada valendo-se de um gerador com ímãs e enrolamento de fio em uma armadura de ferro.

Cerca de 50 anos depois das experiências de Faraday e Henry, foram obtidos geradores comercialmente aproveitáveis. Tais conquistas devem-se às contribuições de Thomas Edison, Edward Weston, Nikola Tesla, John Hopkinson e Charles Francis Brush.

O trabalho conjunto desses inventores e seus processos conduziram à invenção da lâmpada elétrica (1870) e à construção da primeira central de energia elétrica com sistema de distribuição (1872), contribuindo para a instalação da Indústria do Setor Elétrico (ISE), no fim do século XIX.

A fase inicial da ISE foi marcada por debates quanto à alternativa tecnológica a ser adotada, debates sobre a corrente contínua ou a corrente alternada.

Thomas Edison defendia a geração em plantas de pequeno porte, voltadas a atender mercados locais, enquanto Westinghouse propunha a construção de centrais de grande porte e o transporte da energia gerada até os mercados locais, utilizando redes de distribuição.

O transporte da energia elétrica acontecia em baixa voltagem, o que provocava elevadas perdas de energia, encarecendo o custo do transporte em função da distância.

A utilização da corrente alternada ofereceu a alternativa tecnológica de elevação da tensão para o transporte e sua posterior redução para o consumo, reduzindo, conseqüentemente, as perdas no transporte, bem como maior cobertura geográfica do fornecimento de energia elétrica, incrementando sua demanda e possibilitando economias de escala na geração de energia.

Em termos tecnológicos, a geração de energia a dínamo, que produzia corrente contínua, foi substituída pela corrente alternada gerada a partir de turbinas a vapor, cujas inovações nas áreas de caldeiraria resultaram na elevação da temperatura e da pressão do vapor utilizadas nas turbinas, o que gerou ampliação de escala e melhoria no rendimento térmico das centrais elétricas, reduzindo custos de geração.

Desde as primeiras centrais de geração até hoje, muito se evoluiu em termos tecnológicos, adotando-se diversas alternativas de geração de energia: geração térmica a vapor, a gás, a carvão, a óleo combustível, geração hidráulica, geração nuclear e geração eólica, dentre outras.

História da energia elétrica no Brasil

A trajetória brasileira decorre de iniciativas do meio do século XIX, com o carvão mineral importado se constituindo como fonte de energia para transportes, algumas indústrias e iluminação.

Entre 1879 e 1890, várias instalações de pequeno porte foram feitas para a geração e utilização de energia elétrica, tais como a iluminação pública da cidade de Campos (RJ), a usina hidrelétrica de Marmelos, em Minas Gerais, com a finalidade de suprir a fábrica de tecidos do próprio construtor da usina, Bernardo Mascarenhas, e a iluminação pública da cidade de Juiz de Fora.

No período entre 1890 e 1900, foram instaladas 10 pequenas usinas, com capacidade instalada de 1.200 kW, que pretendiam, basicamente, atender à demanda representada pela iluminação pública, mineração, beneficiamento de produtos agrícolas, indústria têxtil e serrarias.

Na virada do século XIX para o século XX, o potencial de desenvolvimento das cidades de Rio de Janeiro e São Paulo atraiu o capital estrangeiro para a instalação de companhias de energia elétrica no Brasil, desenvolvendo a geração hidrelétrica brasileira.

Até a década de 30, a presença do Estado no setor elétrico foi bastante limitada, se resumindo a algumas medidas isoladas de regulamentação. Em 1934, foi promulgado o Código de Águas, que atribuiu à União o poder de autorizar ou conceder o aproveitamento de energia hidráulica e estabeleceu a distinção entre a propriedade do solo e a propriedade das quedas d'água e outras fontes de energia hidráulica para efeito de aproveitamento industrial. Todos os recursos hídricos foram incorporados ao patrimônio da União.

A década de 40 se caracterizou pelo choque entre as correntes favoráveis à nacionaliza-

ção do setor elétrico e aquelas mais liberais, que defendiam o capital estrangeiro.

Após a Segunda Guerra Mundial, a demanda começou a ultrapassar a oferta de energia elétrica em decorrência do crescimento da população urbana e do conseqüente avanço da indústria, do comércio e dos serviços, iniciando um período de racionamento de energia nas principais capitais brasileiras.

No período, os governos se aliaram na reorganização do sistema elétrico em bases estatais. Foram criadas a Comissão Estadual de Energia Elétrica (CEEE), no Rio Grande do Sul, em 1943, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em Pernambuco, no ano de 1946, e as Centrais Elétricas de Minas Gerais – CEMIG, em Minas Gerais, em 1952, marcando o início de um novo estágio no desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

Ao longo da década de 50, praticamente todos os estados da federação constituíram empresas estatais de energia elétrica a partir da absorção das empresas estrangeiras.

Com a constituição da Centrais Elétricas Brasileiras S.A – Eletrobrás, em 1961, foi delineada a estrutura do setor elétrico brasileiro, que vigorou até meados da década de 90, quando houve o início da reestruturação do setor (CABRAL, 2000).

Cenário atual da energia elétrica no Brasil

No setor elétrico, o Brasil dispõe de um enorme potencial para a exploração de fontes de energia renováveis e não renováveis e possui vantagem competitiva frente a diversos países, principalmente devido à área que ocupa.

O país segue o caminho da expansão na geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, como eólica, hídrica ou biomassa – e com destaque para a energia solar fotovoltaica. Entretanto, esse potencial não tem sido aproveitado devido à falta de políticas concretas para cada alternativa energética.

Promover a integração das fontes renováveis de energia é o grande desafio que o setor irá enfrentar futuramente, principalmente em um país onde a maior parte da energia elétrica consumida tem procedência de empreendimentos hidrelétricos, que respondem por mais de 70% de toda a capacidade instalada do país. O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo e agregar mais geração de fontes renováveis contribuirá para torná-la ainda mais sustentável (ABESCO, 2009).

Em relação à inovação tecnológica para o setor elétrico, as empresas começam a desenvolver atividades ligadas a redes elétricas inteligentes, transmissão de energia de ultra alta tensão, geração de energia solar e eólica, além de veículos híbridos e eficiência energética veicular.

O setor de distribuição de energia vem enfrentando sobressaltos desde 2013, quando ocorreu uma situação hidrológica desfavorável, com a subcontratação de distribuidoras, resultando em um desequilíbrio financeiro, cujas conseqüências perduram até hoje. Na sequência, veio a retração na economia. A energia passou a sobrar nas distribuidoras, ao mesmo tempo em que os preços das tarifas desabaram.

As duas crises, climática e econômica, geraram prejuízos aos consumidores e às distribuidoras. “Para um país de dimensões continentais como o Brasil, com um sistema de distribuição de energia tão complexo e único, garantir o fornecimento a milhões de pessoas não é tarefa fácil”, pondera Nelson Fonseca Leite. “Portanto, é fundamental proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade”, ressalta (PROCEL, 2012).

Segundo ele, são necessárias medidas urgentes para mitigar as conseqüências do desequilíbrio e resgatar a sustentabilidade do negócio, de maneira que as distribuidoras possam

concentrar sua atenção na sua missão principal, que é fazer os investimentos necessários para prestar um serviço de qualidade aos consumidores.

Por outro lado, o presidente alerta que as distribuidoras brasileiras devem se preparar para os novos tempos. “Temos que buscar sustentabilidade para investir no incremento de qualidade e modernização das redes elétricas”, afirma. A atuação da Abradee nesse contexto é fundamental, pois conta com 51 associadas, que correspondem a 99,5% do mercado de distribuição de energia elétrica do país.

O setor contempla 77 milhões de consumidores e é responsável por um investimento da ordem de R\$ 12 bilhões ao ano em compra de novos equipamentos, treinamento de pessoal, conscientização da população sobre cuidados com a rede elétrica, expansão da rede, atendimento aos consumidores, combate a furtos e fraudes etc.

O presidente da Abradee menciona ainda que, mesmo com a situação conjuntural desfavorável no cenário hidrológico, que elevou substancialmente as despesas com compra de energia e implicou custos adicionais que não estavam cobertos pelas tarifas, o setor de distribuição manteve os investimentos e os resultados continuam estáveis ou em evolução.

Para o consumidor final, o presidente explica que a manutenção da bandeira tarifária verde – que significa que a situação da produção de energia do país está mais favorável e a conta da luz sem cobrança extra – se deve, em parte, pela queda da demanda por energia no país.

O futuro da energia elétrica no Brasil

O consumo de eletricidade no Brasil cresceu 47% na última década (EPE, 2011), chegando a 455,7 TWh em 2010. Projeções realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no Plano Decenal de Expansão de Energia para 2020, estimam que o consumo aumente 55,6% até lá, chegando a 659 TWh.

Para atender à demanda, está previsto e contratado um aumento de 51% da capacidade instalada, passando dos 113.327 MW em operação ao fim de 2010 para 171.138 MW em 2020. As novas centrais serão, em sua maioria, grandes centrais hidrelétricas (32.184 MW), mas também estão previstas centrais termelétricas movidas por combustíveis fósseis (8.857 MW), centrais termonucleares (1.405 MW) e centrais movidas por fontes alternativas (18.009 MW), que incluem energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (EPE, 2011).

Entretanto, a expansão da matriz brasileira está baseada no paradigma da geração centralizada, caracterizado por grandes usinas instaladas e distantes dos centros de consumo, principalmente no caso das grandes hidrelétricas, que precisam ser construídas onde há potencial hidrelétrico disponível.

O paradigma apresenta vantagens, principalmente no planejamento da expansão e operação do sistema e nos ganhos da economia de escala. Entretanto, a distância entre a geração da eletricidade e o local de consumo acarreta perdas consideráveis na transmissão e distribuição da eletricidade que, em 2010, foram de 17,2% no Sistema Interligado Nacional, equivalentes a 88,2 TWh, suficiente para abastecer 47,7 milhões de residências (EPE, 2011).

Outro aspecto negativo do paradigma é o impacto socioambiental causado pelas usinas, caracterizado pelas áreas inundadas e comunidades deslocadas pela implantação das grandes usinas hidrelétricas e pelas emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) e outros poluentes que ocorrem durante a operação das usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis.

Nos últimos 100 anos, devido a um progressivo aumento na concentração dos gases de efeito estufa, a temperatura global do planeta tem crescido, o que tem sido provocado, principalmente, pelas atividades humanas que emitem esses gases, tais como a atividade pecuária,

que é responsável por 51% das emissões de gases do efeito estufa. A potencialização do efeito estufa pode resultar em consequências sérias para a vida na Terra no futuro próximo.

Uma alternativa ao paradigma da geração centralizada é a geração distribuída (GD), caracterizada como uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou ao consumidor.

A GD já é bastante utilizada no setor industrial e em alta tensão, tanto na forma da cogeração, sendo gerados calor e energia elétrica conjuntamente ou com grupos motores-geradores, que entram em operação no horário de ponta, para poderem reduzir os gastos com eletricidade.

Entretanto, uma forma de GD que está aumentando, principalmente nos países europeus, Estados Unidos e Japão, é a geração distribuída de pequeno porte em edificações, realizada principalmente por sistemas fotovoltaicos.

Dessa forma, os imóveis passam a gerar sua própria eletricidade, utilizando uma fonte de energia renovável, e fazendo com que novos investimentos em usinas de geração e infraestrutura de transmissão e distribuição possam ser adiados.

Além disso, por gerarem eletricidade nas proximidades do ponto de consumo, reduzem consideravelmente as perdas por transmissão e distribuição. No Brasil, foi aprovada, em 2012, a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, que estabelece as regras para a utilização da geração distribuída no Brasil. Assim, residências e empresas podem instalar um sistema fotovoltaico e conectá-lo à rede, gerando sua própria energia a partir do Sol (EPE, 2011).

Segundo o Balanço Energético Nacional, as edificações, que compreendem os setores residencial, comercial e público, foram responsáveis por 14% do consumo de energia primária no Brasil em 2010.

Nos três setores, a eletricidade é a principal fonte de energia e, quando avaliada apenas essa fonte, a participação das edificações sobe para 46,9% do total, com o setor residencial responsável por 23,8% (108,45 TWh), o comercial por 15% (68,19 TWh) e o setor público com 8,1% (37,01 TWh) do total (EPE, 2011).

Assim, a geração de eletricidade nas edificações brasileiras apresenta um grande potencial para reduzir não só as perdas intrínsecas à distribuição de energia, como também a demanda e, conseqüentemente, a infraestrutura necessária para atendê-la nos próximos anos (EPE, 2011).

Histórico do Stand by

Em 1950, foi criado o primeiro controle remoto, o qual realizava o comando por cabos e recebeu o nome de “ossos preguiçosos”. A criação do led comercial, em 1962, por Nick Holonyak, e o desenvolvimento do controle remoto sem fio com utilização de raios infravermelhos, no início da década de 80, tiveram papel fundamental na permissão do modo de operação em stand by e seu uso em larga escala.

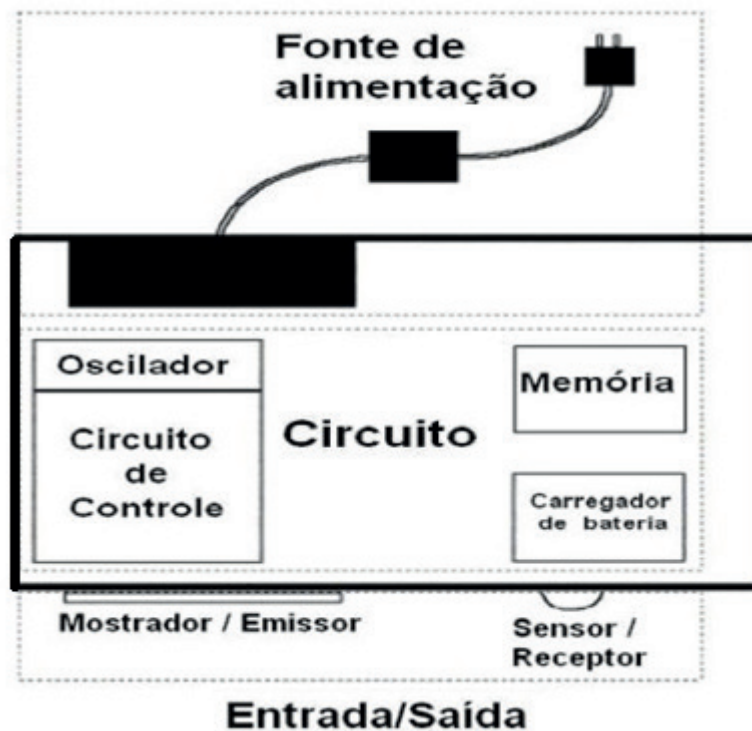
Após 1995, foram publicados maciçamente estudos e artigos a respeito do consumo de energia em stand by, por pesquisadores do Japão, Holanda, Estados Unidos, Austrália, Bélgica, França e Alemanha.

O conceito, que era para ser uma comodidade a todos, por ser algo prático e acessível, se tornou um grande vilão no consumo de energia elétrica. Uma simples indicação de equipamento ligado era responsável por quase 15% do valor da fatura de energia elétrica. Somente anos depois foram feitos estudos para reduzir o consumo de energia elétrica no modo stand by, porém ainda nada foi desenvolvido para que evitasse esse consumo desnecessário.

Redução do consumo em stand by

Desde que os estudos sobre standby começaram a ser divulgados, houve a iniciativa de muitos autores para a busca de alternativas para redução do consumo de energia neste modo de operação. O esquema a seguir mostra a explicação de como ocorre o consumo em stand by.

Figura 1. Circuito de consumo no modo stand by



Fonte: O autor.

O esquema indica a existência de três formas de circuitos em que ocorre o consumo em stand by: fonte de energia, operação e componentes de entrada e saída. Se o equipamento opera em stand by, há necessidade de ter uma alimentação de energia para o equipamento.

As perdas que ocorrem com a passagem da corrente pelos circuitos dependem exclusivamente da eficiência dos circuitos. O consumo total de stand by é praticamente a soma de todas as perdas individuais dos componentes. As maiores perdas ocorrem nos circuitos de entrada e de saída:

- fontes lineares 110/220 V AC / 5 V DC (na ordem de 0,8 W);
- fontes chaveadas (em torno de 0,3 W);
- LEDs (0,3 W);
- componentes de recebimento do sinal do controle remoto (0,2 W).

Princípio de funcionamento

Os fabricantes recorrem ao sinal da Figura 2, utilizado ao ligar aparelhos eletroeletrônicos, para informar ao cliente que o aparelho está em stand by.

Figura 2. Símbolo de stand by



Fonte: O autor.

Normalmente, os equipamentos eletroeletrônicos possuem a opção de operarem sob o modo stand by, para rapidamente executarem sua função principal, quando o usuário liga o aparelho pelo controle remoto ou no próprio equipamento. O consumo de energia ocorre pela utilização de circuitos eletrônicos (LEDs, microprocessadores que interpretam os sinais do controle remoto, fontes), sensores, fontes de energia (AC-DC) e por displays.

O stand by pode ser, então, utilizado para manter a capacidade do sinal (controle remoto), monitorar temperatura (no caso de geladeiras) e manter relógio ou display contínuo em operação, além de ser utilizado para carregar baterias.

Uma vantagem a ser atribuída ao stand by é a de manter alguns circuitos ligados, reduzindo o impacto ou influência da umidade na vida útil dos equipamentos. Como desvantagem, aumenta os riscos de incêndio e queima dos aparelhos quando há incidência de sobrecargas de alimentação.

A título de ilustração, uma TV de 21 polegadas gasta, em média, 5 W desligada, e, 95 W em uso. Já uma TV de 29 polegadas gasta 135 W quando ligada e quase 10 W em stand by. Traduzindo em valores, uma potência de 9 W corresponde a cerca de R\$ 2,20 na conta mensal de energia.

Assim, somando TVs, *home theaters*, *decoders* da TV a cabo, roteador, modem de banda larga, telefone sem fio e computadores, o gasto pode atingir valores como R\$ 30 por mês. O consumo é dado por perdas que se traduzem em dissipação de calor dos equipamentos. Os aparelhos ficam “quentes” mesmo quando estão desligados.

Muitas vezes nem se nota o gasto, pois nem sempre ele está aparente. O consumo em stand by existe mesmo quando não há uma luz acesa no aparelho. Um carregador conectado na tomada sem um notebook ou um celular na outra ponta não tem consumo mas tem perda, pois ele está funcionando na transformação de energia. Quanto mais antigos são os aparelhos, mais consomem energia.

Os fabricantes estão trabalhando para reduzir o consumo em stand by, mas os equipamentos em modo de espera nunca terão consumo zero. Assim, a simples troca de uma TV antiga por uma mais moderna pode economizar uma boa parcela da prestação da nova.

A solução é retirar os aparelhos que você utiliza esporadicamente da tomada, mas dependendo do produto, as configurações podem ser perdidas, sendo necessário refazer diversas etapas de ajustes personalizados.

O sistema stand by é realmente cômodo, assim cabe ao usuário decidir se vale a pena o gasto mensal produzido para não perder os ajustes pessoais de cada dispositivo ou compensa manter o consumo para preservar as configurações.

Outra recomendação é o uso de equipamentos com o selo Procel com a classificação A, pois são os que menos consomem na sua categoria.

Figura 3. Selo Procel de eficiência energética



Fonte: Disponível em: <<https://sustentarqui.com.br/wp-content/uploads/2015/05/se-lo-procel-e1432698823385.jpg>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

Metodologia

Com o elevado desperdício no consumo de energia elétrica, temos estudado diversas formas e maneiras de evitar o desperdício, pois muitas vezes os consumidores não sabem, exatamente, o porquê de determinado valor ter surgido na fatura de energia elétrica.

Projeto de automação residencial

O sistema proposto neste trabalho tem como finalidade auxiliar a evitar esse desperdício desconhecido nas residências. Toda a comodidade de sair de casa sem desligar os equipamentos da tomada continuará. Entretanto, será gerenciado por um software interligado à casa, funcionando de forma independente, produzindo sua própria energia para o funcionamento de todo o sistema. O sistema é simples, porém, tem um grande potencial de corrigir parte dos gastos desnecessários.

A estrutura principal do projeto de automação residencial é a utilização do Arduino, que faz a comunicação entre os componentes instalados para tela do painel ou para o smartphone cadastrado, sendo possível a execução de modo local ou remoto.

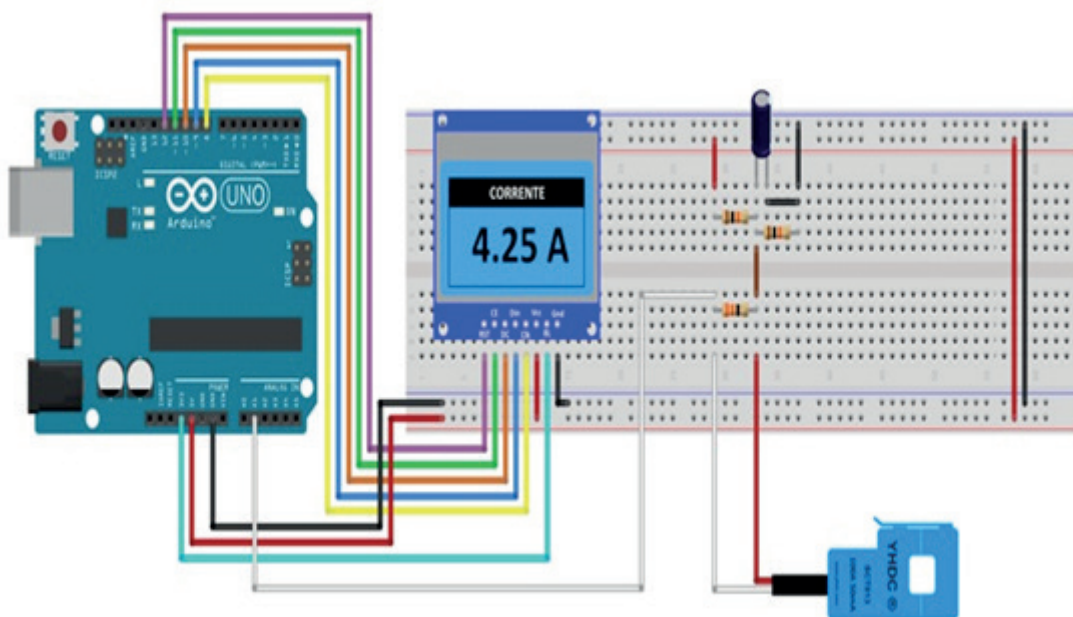
Sendo assim, o equipamento estará conectado diretamente à internet, para que o usuário consiga utilizar o equipamento no modo manual remotamente. No modo autônomo, o sistema verificará se existem usuários dentro da residência através de sensores infravermelhos instala-

dos em cada cômodo.

A partir do momento em que não houver mais movimento, é temporizado um tempo programado, para que a casa desligue os contadores programados. Entretanto, se o morador optar em desligar antes da temporização, terá que fazer um comando ao equipamento na hora da saída.

Através do aplicativo instalado no smartphone, será possível acompanhar, em tempo real, o consumo da residência.

Figura 4. Esquema de ligação Arduino



Fonte: O autor.

Materiais de desenvolvimento do projeto

O projeto utiliza equipamentos de fácil acesso e de custo de fabricação acessível, para que, dessa forma, todos possam ter condições de tê-los instalados em suas residências, com um *payback* muito atrativo.

Microcontroladores

Os microcontroladores, em sua maioria, são pequenos e dispõem da melhor relação custo/benefício, quando se tem em mente uma utilização que envolva processamento de dados obtidos por sensores. Esses são empregados em quase tudo que possua eletrônica.

São dispositivos que agregam internamente todos os componentes que são requisitos necessários para um funcionamento autônomo. Os microcontroladores agregam vários recursos alocados em um único componente, como portas de entrada e saída, memória, processador, dentre outros, montados em um circuito de forma integrada e com dimensões muito pequenas.

Há não muito tempo, para se confeccionar um circuito interativo, era necessário fazer projetos do zero para uma aplicação específica. Para fazermos pequenas alterações nas funcionalidades do circuito, era necessário um estudo crítico e bastante trabalho.

Com a chegada dos microcontroladores, foi possível que problemas tratados com hardware fossem agora tratados usando software de computadores. Dessa forma, um mesmo circuito poderia tomar funções totalmente diferentes, reprogramando e alterando alguns parâmetros do programa.

Ainda, trabalhar com microcontroladores não é tão trivial. Por esse motivo, um grupo de pesquisadores italianos teve a ideia de fazer um dispositivo que tornasse o seu uso simples e acessível para qualquer pessoa. O resultado foi o Arduino.

O Arduino é uma plataforma de hardware livre, projetado com um microcontrolador Atmel AVR. É uma placa de código aberto baseada em um circuito de entradas/saídas simples, microcontrolada e desenvolvida em uma biblioteca que simplifica a escrita da programação em C/C++.

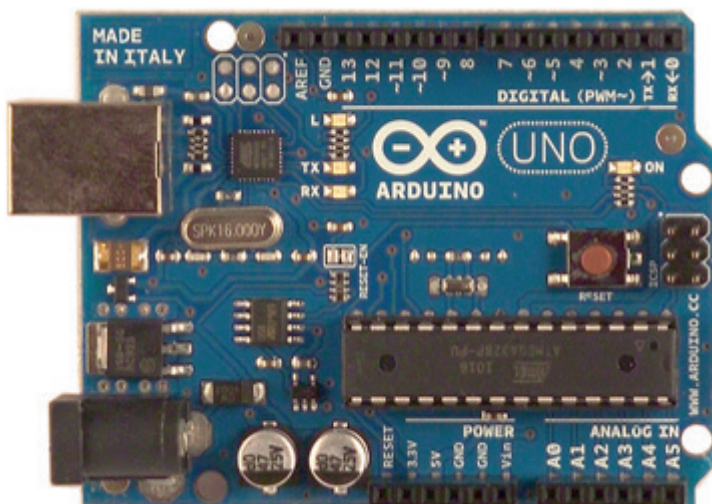
O microcontrolador na placa pode ser programado com a linguagem de programação Arduino, que é baseada na linguagem *Wiring* e seu ambiente de desenvolvimento é baseado no *Processing*. A linguagem do Arduino é um conjunto de funções C/C++ que podem ser chamadas em seu código.

Ele é de código aberto. O código do ambiente Java é liberado sob a licença GPL (Licença Pública Geral), as bibliotecas microcontroladoras C/C++ sob LGPL, e os esquemas e arquivos CAD sob *Creative Commons Attribution Share-Alike*.

O Arduino consiste em um kit de desenvolvimento que interpreta as variáveis no ambiente para transformá-las em sinal elétrico através de sensores ligados aos terminais de entrada, controlando ou acionando algum outro elemento eletroeletrônico conectado ao terminal de saída.

Em outras palavras, é uma ferramenta de entrada e saída de dados, que pode ser acionada por um sensor e, depois, é processada para poder acionar um atuador. A Figura 5 mostra uma placa de Arduino.

Figura 5. Arduino



Fonte: O autor.

Características de módulos de processamento

No quesito facilidade de aprendizagem, os CLP's se sobressaem em relação aos microcontroladores. O CLP demanda que o programador saiba interpretar comandos elétricos e lógica booleana. Por outro lado, existe um grande diferencial entre os modelos com seus respectivos fabricantes. A implementação de um microcontrolador demanda entendimento de alguns conceitos que são:

- sistema de hardware;
- linguagem de programação;
- montagem de placas;
- além dessas, são necessários certos conhecimentos de softwares de simulação.

O Arduino baseia-se em um sistema que parte da premissa de que a placa já está pronta, sendo assim, facilita a aprendizagem e a manipulação de microcontrolador. Contudo, cada um possui suas características peculiares.

Quadro 1. Comparativo entre CLP's e microcontroladores

Comparativo CLP entre Microcontroladores		
Itens	CLP	Microcontrolador
Projeto	Projetos industriais	Projetos caseiros e industriais de pequeno a grande porte
Configuração	Fácil configuração	Configuração relativamente complexa
Custo	Alto custo	Baixo custo
Aprendizagem	Fácil aprendizagem, exige conhecimento de lógica booleana e comandos	Exige domínio de sistemas digitais e programação de eletrônica geral e eletricidade
Empregabilidade	Grande empregabilidade sobretudo em indústrias	Alta empregabilidade em sistemas embarcados de baixo custo

Fonte: Os autores (2017).

Sensor de corrente não invasivo (SCT-013-000)

O SCT-013-000 é um sensor de corrente AC de ótima precisão, que permite fazer leituras de corrente entre 0 a 100A. O SCT-013-000 é de uso prático, visto que não precisa interromper o circuito para que seja realizada a leitura da corrente, além de ter um excelente custo e benefícios para estudantes, *hobbystas* e profissionais iniciantes da área de eletrônica.

Quadro 2. Características do medidor de corrente por sensor

Características do sensor	Range
Faixa de medição	0 a 100 AAC
Sinal de saída	Corrente (0 a mAC RMS)
Precisão	1%
Tensão máxima	660 VAC
Frequência de trabalho	50 a 1 k Hz

Fonte: Os autores (2017).

A Figura 6 mostra o sensor que foi utilizado para desenvolver as funcionalidades do projeto.

Figura 6. Medidor de corrente por sensor de corrente não invasivo



Fonte: O autor.

Através do sensor de corrente SCT013, é possível a criação de sistemas de medição e monitoramento para correntes elétricas ou, até mesmo, a montagem de circuitos de proteção contra sobrecarga e eventuais problemas que possam acontecer com sua rede.

Medidor de tensão

O medidor de tensão tem a finalidade de monitorar a linha de entrada da residência. Ele atuará em conjunto com o medidor de corrente com sensor não invasivo, calculando o real consumo da residência. Em caso de alguma falha na rede elétrica da residência, ele comunicará ao microcontrolador, enviando as informações para o visor e ao telefone cadastrado.

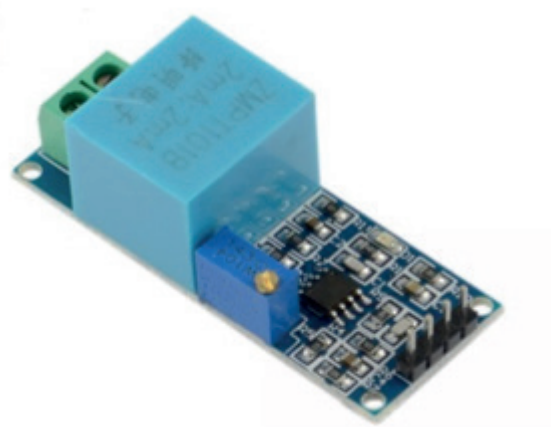
Quadro 3. Características do medidor de tensão

Características do sensor	Range
Tensão de entrada	0 a 250 VAC
Proporção de divisão	50:1
Precisão	1 %

Fonte: Os autores (2017).

A escolha desse modelo de medidor de tensão aconteceu justamente por possuir uma ótima relação custo x benefício. A Figura 7 mostra o modelo do sensor utilizado.

Figura 7. Medidor de tensão



Fonte: O autor.

Por ser muito eficiente, o sensor de tensão P8 será utilizado como voltímetro, ou seja, como medidor de tensão AC no projeto, de forma a monitorar a tensão de entrada.

Contator impulso

Como a finalidade do sistema é poder operar em modo autônomo, ele contará com o auxílio de sensores para poderem informar a hora de abertura e fechamento da carga.

Todas as fases que saem dos disjuntores serão monitoradas por esse medidor de corrente com sensor. Cada fase por um contator impulso, chaveando cargas com um simples pulso. Esse contator tem a mesma finalidade do que uma chave de liga/desliga, porém, de modo automático.

Sendo assim, a instalação da residência permanece a mesma, somente havendo a necessidade de serem adicionados mais equipamentos para a nova automação. A Figura 8 mostra um contator impulso.

Figura 8. Contator impulso



Fonte: O autor.

A aplicação proposta para o contator de impulso é controlar a distribuição de energia em automação residencial.

Um contator biestável pode ser usado para chavear a alimentação de uma residência depois dos disjuntores, sendo controlado por um pulsador, com saída programada para tal função no Arduino.

Quadro 4. Características do contator por impulso

Características do Contator	Range
Tensão de entrada	Até 440 VAC
Corrente de trabalho	De 20 a 63 A
Configurações de contatos	1, 2 ou 4 contatos

Fonte: Os autores (2017).

A vantagem de utilizar um contator de impulso nessa aplicação é que mesmo em caso de falta de energia, e que sua bobina não esteja energizada, ele manterá o estado de seus contatos comutados.

Sistema de alimentação solar

Como a finalidade do sistema é a redução do desperdício de energia elétrica de uma residência, o próprio sistema contará com uma alimentação independente, contendo uma placa solar e uma bateria, deixando o sistema operante por 24 horas. A Figura 9 mostra um painel solar de 50 W, que será utilizado no projeto proposto.

Figura 9. Painel solar



Fonte: O autor.

Para comparar modelos de painéis, as condições de laboratório foram estabelecidas para poderem manter a uniformidade nos padrões de medição dos painéis solares.

Quadro 5. Características do painel solar 20 w

Características do painel solar	Range
Potência máxima (Pmax)	50 W
Tolerância da potência	$\pm 5 \%$
Corrente de potência máxima	2,86 A
Eficiência da célula	13,7 %

Fonte: Os autores (2017).

Além dos painéis, serão utilizados controladores de carga ou carregadores, que ficam entre os painéis e as baterias e são utilizados para controlar a tensão de entrada, evitando sobrecargas ou descargas excessivas, otimizando e prolongando a sua vida útil.

Os painéis solares produzem mais ou menos energia de acordo com a quantidade de luz solar, e as baterias não suportam essa variação. Para resolver o problema e, também, para aperfeiçoar o carregamento das baterias, são utilizados os controladores de carga.

Figura 10. Controlador de carga



Fonte: O autor.

Os controladores de carga são utilizados principalmente em sistemas isolados da rede, ou seja, autônomos, compostos por módulos fotovoltaicos, ligados em um regulador que, por sua vez, está ligado a baterias para alimentação.

Os reguladores de carga devem ser selecionados dando atenção às características do sistema fotovoltaico utilizado e às características de tensão e corrente envolvidas no sistema solar fotovoltaico.

Quadro 6. Características do controlador de carga

Características do painel solar	Range
Potência máxima de painel solar	240 W
Tolerância da potência	$\pm 5\%$
Corrente de potência máxima	10 A
Tensão de saída	12/24 VDC

Fonte: Os autores (2017).

Como o sistema apresenta baixo consumo de energia, será utilizada uma bateria de modelo estacionária para armazenar a energia captada pelos painéis solares, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11. Bateria 12 V - 7 A.



Fonte: O autor.

As baterias estacionárias são baterias projetadas para ciclos de descarga profundos, com materiais internos nobres e placas de chumbo mais espessas, feitas para durarem por mais tempo.

As aplicações típicas de baterias estacionárias incluem sistemas UPS (*no-breaks*), centrais telefônicas, alarmes, sistemas de som, energia solar e eólica, iluminação de emergência ou qualquer outra aplicação que demande uma corrente moderada por mais tempo, ao invés de uma grande quantidade de corrente por alguns segundos.

Quadro 7. Características da bateria

Características da bateria	Range
Tensão nominal	12 VDC
Capacidade nominal	7 A
Corrente de curto circuito	130 A
Índice de inflamabilidade	HB

Fonte: Os autores (2017).

Por serem fabricadas com materiais nobres, também são menos suscetíveis a vazamentos da solução ácida, explosões, oxidação dos terminais e outros problemas.

Sensor infravermelho passivo

Uma das funções do sistema é o modo autônomo e, para que seu funcionamento seja eficaz, deve haver a necessidade de instalar um sensor infravermelho por cômodo para termos uma boa eficiência. A Figura 12 mostra o sensor infravermelho.

Figura 12. Sensor infravermelho



Fonte: O autor.

Esses sensores também são comumente conhecidos como detectores infravermelhos passivos ou, ainda, sensores PIR, pois detectam a luz infravermelha do ambiente. Qualquer tipo de corpo, seja de animal ou de ser humano, emite energia infravermelha, pois libera calor.

A quantidade de energia infravermelha que é emitida depende muito da temperatura do corpo. Em seres humanos, o comprimento de onda é entre 9 e 10 micrômetros, e grande parte dos sensores passivos detecta emissões de calor infravermelho na faixa entre 8 a 12 micrômetros.

Quadro 8. Características do sensor

Características do sensor	Range
Tensão alimentação	9 a 12 VDC
Tempo de acionamento	2 segundos
Tempo de estabilização	2 minutos
Detecção máxima	14 metros/ 88,5°

Fonte: Os autores (2017).

Os componentes principais de um detector de movimento são a lente de Fresnel e o PIR. A lente de Fresnel, basicamente, direciona luz infravermelha detectada do ambiente para o elemento PIR. O PIR é um componente que converte a luz infravermelha em pulsos elétricos.

Pesquisa de campo

Com o intuito de correlacionar os estudos envolvidos com uma realidade do uso de equipamentos eletroeletrônicos no modo de operação em stand by, foi aplicada uma pesquisa de campo domiciliar, que por si só trouxe elementos diferentes e contém diversos dados sobre a utilização dos eletrodomésticos existentes, bem como a forma de consumo em stand by, caracterizando a aplicação de um método científico para validar o estudo proposto.

O método empregado para o recolhimento de dados da residência foi através de um Multímetro Digital ET-2082D – Minipa, aferido, com a função de medição de corrente alternada. Com esse equipamento, é possível fazer a coleta de dados da residência e, através dos valores recolhidos, efetuar os cálculos para análise e comparação.

É com esse intuito que buscamos analisar todos os detalhes e abordagens do assunto em questão. Entretanto, por mais que o interesse fosse amplo, não foi possível esgotar todas as possibilidades de análise dos dados envolvidos, mas foi possível agregar importantes conhecimentos de aplicação imediata e permitir conclusões adequadas.

Procedimento adotado nas medições

A realização das medições foi efetuada na residência de um dos autores, com o intuito de definir uma classe de usuários para cada tipo de residência. A residência escolhida para o recolhimento de dados tem diversos equipamentos que ficam conectados à rede elétrica diariamente. Dentre eles, quatro aparelhos de ar-condicionado, três televisores com receptor, dois roteadores, um microcomputador conectado à impressora, um notebook, um aparelho de som, um telefone sem fio e um micro-ondas.

A fim de compor com a entrevista, o objetivo é averiguar as medições dos equipamentos

eletroeletrônicos, com o intuito de obtermos dados concretos referentes ao real consumo. Ainda, no fim do lançamento dos valores na base de dados, o objetivo é verificar qual é o consumo energético quando os equipamentos operam em sua função principal e em stand by, e qual a representação de ambos em relação ao consumo médio mensal.

Definições

Foram selecionados alguns procedimentos para embasamento das medições dos equipamentos em stand by. É indicado que se espere algumas horas ou minutos para haver estabilização da temperatura, tensão etc. Não haveria como esperar horas ou minutos para estabilização, pois o tempo para leitura seria muito extenso.

Assim, os procedimentos adotados de leitura foram, preferencialmente, realizar a leitura do consumo de energia com tempo de integração de dez minutos e realizar a leitura instantânea de tensão, corrente, potência dos equipamentos em operação e em stand by, de forma que não comprometa a amostragem dos dados.

Na Figura 13, observamos a leitura dos dados de cada disjuntor da residência para cálculos de consumo. Devemos ressaltar que não havia ninguém na residência no momento das medições e, ainda, todas as lâmpadas estavam desligadas.

Figura 13. Medição em campo



Fonte: Os autores (2017).

Outro quesito importante foi a ausência de equipamento que filtrasse a entrada de harmônicos da rede. Tais testes minuciosos e com esse rigor são realizados pelo Inmetro e por seus laboratórios credenciados, de forma que as medições apresentaram dados compatíveis com os dados registrados nos medidores.

Para a realização do cálculo mensal de energia dos equipamentos, quando ligados na sua função principal e, quando ligados em stand by, foi utilizada a Equação (1),

$$C = \frac{P \cdot (t_{ss} \cdot d + t_{sf} \cdot s)}{60 \cdot 1000} \quad , \quad (1)$$

C: consumo, em kWh, mensal, em operação ou em stand by;
P: potência, em watt;
tss: tempo, em minutos, de segunda a sexta, em operação ou stand by;
tsf: tempo, em minutos, entre sábado e domingo, em operação ou stand by;
d: média de dias da semana;
s: média de dias de final de semana.

O equipamento utilizado nas medições foi o Multímetro Digital modelo ET-2082D da marca Minipa. Esse equipamento tem como principal vantagem a precisão para obtenção de dados em stand by ou medições que envolvam correntes de pequena intensidade: 0,1% para leitura + 0,1% do display para as seguintes faixas – tensão de até 1,0 kV; 0,5 mA até 20 A; frequência de 10 Hz a 10 kHz.

Resultados e discussões

Foram discutidos a viabilidade de implantação do sistema, bem como o *payback*, juntamente com os valores das medições realizadas na residência utilizada para obtenção de dados.

No decorrer da elaboração do projeto foi realizada uma pesquisa em campo com um questionário, a fim de verificar o conhecimento das pessoas entrevistadas referente ao assunto abordado, verificando se os equipamentos ficam conectados diariamente na energia elétrica e o gasto mensal, em kW.

Resultados obtidos em campo

Para verificar se o projeto proposto tem alguma eficiência econômica, foi realizado um relatório de gastos da residência utilizada para fornecimento de dados.

Para o levantamento de dados, foi simulado um dia comum de uso da família, que é composta por quatro membros. Não havia ninguém na residência e os equipamentos de uso comum estavam conectados à rede elétrica. Dentre eles, modem, roteador, receptores, televisores, impressora, estabilizadores, micro-ondas, rádio e os aparelhos de ar-condicionado.

Na época em que a casa foi construída, o projeto elétrico da residência foi realizado pelo próprio engenheiro civil, por isso a residência conta com certas divergências com as normas propostas pela época. O quadro de disjuntores é composto por seis disjuntores.

Quadro 9. Valores de carga

Nº	Disjuntor	Carga medida	Potência
1	Cozinha/lavação/garagem/dispensa	2.10 A	462 W
2	Ar-condicionado	0.005 A	1.1 W
3	Quartos	0.250 A	55 W
4	Suíte/chuveiro	0.009 A	1.98 W
5	Sala/Copa	0.160 A	35.2 W

Fonte: Os autores (2017).

Dos valores coletados, ignora-se o disjuntor 1, pois nele estão ligados equipamentos que não podem ser desligados, como freezer e geladeira, desconsiderando o valor consumido pelo micro-ondas. Para encontrar o valor mensal gasto em stand by, basta utilizar a Equação (2).

$$\text{Consumo (kWh): } \frac{\text{Potência} \times \text{horas de funcionamento}}{1000} \quad (2)$$

Os equipamentos medidos ficam ligados 24 horas por dia, em modo stand by. Substituindo-se, na Equação (3), temos os seguintes valores:

$$\text{Consumo (kWh): } \frac{93.28 \text{ W} \times 24\text{h} \times 30 \text{ dias}}{1000} = 67.16 \text{ kWh/mês} \quad (3)$$

A equação (3) mostra que o valor de consumo é de 67.16 por mês, convertendo esse valor para reais, conhecendo-se o valor da tarifa cobrada pela concessionária de energia elétrica e multiplicando-se pelo valor obtido. O valor utilizado para conversão foi 0,43 reais, como observamos na Equação (4).

$$\text{Valor em reais: } 67.16 \text{ kWh/mês} \times 0.43 \text{ reais} = 28,87 \text{ reais.} \quad (4)$$

O resultado obtido é uma estimativa do consumo desperdiçado na residência. Entretanto, esses valores podem variar. Na equação utilizada, foi considerado que os equipamentos estejam em stand by e conectados à rede elétrica.

Com os dados colhidos, obteve-se o real consumo desnecessário da residência, o qual ultrapassou 10% o valor da fatura mensal da residência testada.

Custo de implantação

O custo de montagem do sistema tem um valor baixo, se considerar sua eficiência e suas funcionalidades de uso.

Os valores utilizados para verificar o *payback* do sistema podem variar dependendo das marcas e dos equipamentos utilizados.

Quadro 10. Lista de materiais

Item	Equipamentos	Quantidade	Valor
1	Arduino Uno	1	R\$ 25,00
2	Sensor de corrente	1	R\$ 23,00
3	Sensor de tensão	1	R\$ 12,00
4	Sensor de presença	Depende da quantidade de cômodos (mínimo 1)	R\$ 20,00
5	Contator Impulso	Depende da quantidade de disjuntores (mínimo 1)	R\$ 40,00
6	Painel Solar 50 W	1	R\$ 143,00
7	Controlador de carga	1	R\$ 22,00
8	Bateria 7 A - 12 V	1	R\$ 70,00
Total			R\$ 355,00

Fonte: Os autores (2017).

Caso o equipamento fosse instalado na casa utilizada para recolhimento de dados, haveria a necessidade de aumentar o número de sensores de presença para seis unidades, e o contator impulso para quatro unidades. Dessa forma, o sistema teria uma eficiência muito melhor. Com essas alterações, o projeto terá um valor final de implantação de aproximadamente R\$ 575,00 reais.

O consumo médio mensal da residência com energia elétrica é de R\$ 210 reais por mês. Com os cálculos efetuados, obteve-se um valor médio mensal de desperdício de, aproximadamente, R\$ 28,87 reais, o que representa 13.75% da fatura.

Com os valores calculados nas Equações (1) – (4), temos o *payback* do sistema implantado na residência, usado para recolhimento de dados de aproximadamente 20 meses.

Pesquisa realizada em campo

Durante o desenvolvimento do projeto, foi realizada uma pesquisa, na qual 48 participantes com idades entre 18 e 36 anos responderam ao questionário. O objetivo foi verificar qual o nível de conhecimento referente ao tema abordado e verificar se o projeto depois de desenvolvido seria aceito.

O levantamento inicial teve por intuito averiguar em qual tipo de domicílio as pessoas entrevistadas residem. Verificamos, através do Gráfico 1, que o número de casas é maior.

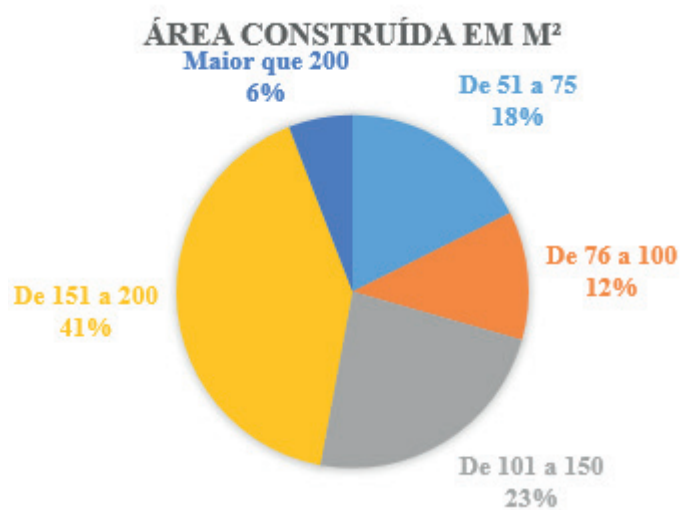
Gráfico 1. Moradias: casas x apartamentos



Fonte: Os autores (2017).

Outro fator importante que atinge diretamente o consumo de energia é o tamanho da residência. Quanto maior for a residência, mais cômodos e tomadas a casa terá.

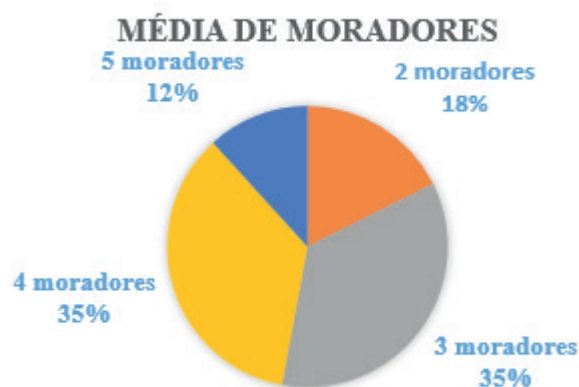
Gráfico 2. Tamanho das residências



Fonte: Os autores (2017).

A independência dos jovens está aumentando bastante. O mundo parece estar cada vez mais individualista. Entretanto, a grande média ainda prevalece nas famílias conservadoras entre três e cinco moradores por residência.

Gráfico 3. Média de moradores

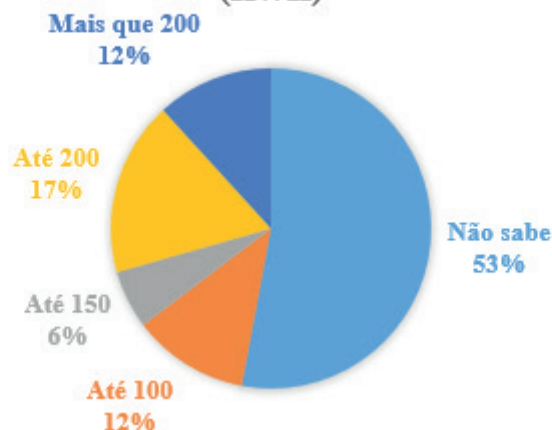


Fonte: Os autores (2017).

O resultado dessa pesquisa foi que boa parte dos entrevistados não tem ideia ou não sabe o valor de consumo de energia elétrica da residência, conforme mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4. Consumo mensal

**MÉDIA MENSAL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
(KWH)**

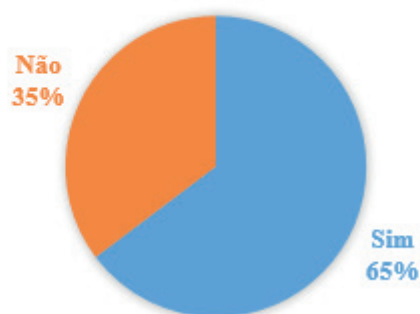


Fonte: Os autores (2017).

O maior desperdício das residências acontece quando os equipamentos que não são utilizados ficam conectados à rede elétrica permanentemente. No Gráfico 5, podemos observar que 65% das pessoas não desconectam os equipamentos por ser mais cômodo.

Gráfico 5. Equipamentos conectados à rede elétrica

**OS EQUIPAMENTOS FICAM SEMPRE CONECTADOS NA
REDE ELÉTRICA?**

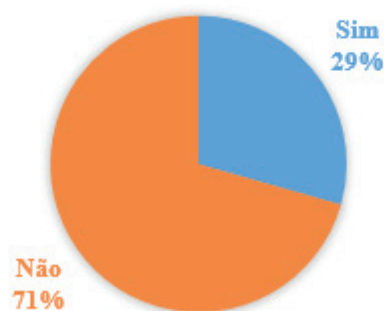


Fonte: Os autores (2017).

O desperdício de consumo e de energia elétrica é pouco repercutido, e muitas vezes, na hora da compra do equipamento, não levamos em consideração o valor do consumo em stand by, que é apresentado nos equipamentos com o selo Procel. No Gráfico 6 são apresentados os resultados.

Gráfico 6. Desperdício do stand by

CONHECIMENTO SOBRE O CONSUMO DO STAND BY



Fonte: Os autores (2017).

No Gráfico 7, temos o resultado referente à preocupação com o desperdício de energia elétrica na residência. A maioria optaria em adquirir o equipamento instalado em suas residências.

Gráfico 7. Aquisição do equipamento

VOCÊ COMPRARIA UM EQUIPAMENTO QUE ELIMINASSE O DESPERDÍCIO



Fonte: Os autores (2017).

Com a pesquisa realizada em campo, observamos que a maioria das pessoas ainda mora em residências, com metragens acima de 100 metros quadrados. Elas são compostas, na sua maioria, por mais de três pessoas. Um dado relevante é que a grande maioria não conhece o consumo de sua residência e, ainda, deixa seus equipamentos conectados diariamente, gerando um grande desperdício.

Conclusão

Através das fontes de pesquisa utilizadas para embasamento dos conceitos apresentados e das medições realizadas in loco, foi possível perceber que o consumo em stand by necessita de uma atenção imediata e padronização de métodos de ensaios e de montagem dos equipamentos. O intuito é diminuir o consumo em stand by, ou informar, em valores, o custo mensal dessa função quando utilizada.

Caso não ocorra, o desperdício aumentará no decorrer dos anos. Surgem novos equipamentos eletrônicos a cada instante, e essas pequenas cargas, somadas ao final do mês, se transformam em grandes gastos. Não adianta expandir a geração de energia com novas fontes de geração se uma parte de sua produção é totalmente desperdiçada.

As pessoas estão cada vez mais ocupadas em seu cotidiano e preferem pagar pelo consumo dos equipamentos ao invés de os retirarem da tomada. São medidas simples, fáceis, e quando praticadas, geram inúmeras contribuições para a sociedade e para o meio ambiente.

Um conceito de reeducar a população para evitar desperdícios seria um dos métodos que poderia ser aplicado para a sociedade. Contudo, além de ter um alto custo com mídias para divulgação, só surtiria efeito se todos praticassem o conceito implantado.

O objetivo do equipamento desenvolvido foi, justamente, manter a comodidade para os moradores da residência, sem que houvesse desperdício com a energia elétrica, tendo a possibilidade de acompanhar remotamente o consumo, anulando o desperdício da residência com energia elétrica.

Os custos de implantação para o sistema proposto dependem muito da residência na qual for instalado. Contudo, considerando que a casa tenha aproximadamente 200 m² e, em sua fatura de energia elétrica tenha um desperdício mensal de 10% a 13%, o *payback* do sistema é de até dois anos, tornando o equipamento acessível a todos.

Referências

ABESCO. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **Balanco geral**. 2009. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/datarobot/>>. Acesso em: 14 out. 2017.

BOA NOVA, A. C. **Energia e classes sociais no Brasil**. São Paulo: Loyola, 1985.

CABRAL, Ligia Maria Martins. **Energia elétrica no Brasil, 500 anos**. Centro Memória da Eletricidade no Brasil. Rio de Janeiro, 2000.

EPE. **Balanco energético nacional 2011**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2011.

FORBES. **Internet of things by the numbers 2014**. Market Estimates and Forecasts, 2014.

PROCEL. **Catálogo Selo Procel 2008**. 2008. Disponível em: <<http://www.eletobras.com/> Ca-

talogoSeloProcel2008/artigo.html?cod=artigo>. Acesso em: 23 out. 2017.

_____. **Relatório de resultados de 2012**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com.br>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

ANEXO A – MULTÍMETRO UTILIZADO

Multímetro Digital ET-2082D - Minipa

Especificações:

- Display: 3 1/2 Dígitos, 1999 Contagens (com iluminação).
- Taxa de Amostragem: Aprox. 3 vezes/segundo.
- Indicação de Polaridade: Positiva implícita e negativa “-”.
- Indicação de Sobrefaixa: “OL”.
- Indicação de Bateria Fraca: o desenho de uma bateria é mostrado quando a tensão da bateria cair abaixo da tensão de operação.
- Mudança de Faixa: Manual.
- Desligamento Automático: Após aprox. 15 minutos.
- Ambiente de Operação: 0°C a 40°C (32°F a 104°F), RH<80%.
- Ambiente de Armazenamento: -20°C a 60°C (-4°F a 140°F), RH < 80%.
- Coeficiente de Temperatura: 0.1x(precisão especificada) / 1°C <18°C ou > 28°C.
- Altitude de Operação: 2000m.
- Grau de Poluição: 2.
- Alimentação: 1 x 9V (NEDA 1604, 6F722 ou 006P).
- Segurança / Conformidade: IEC1010 Sobretensão e Dupla Isolação CAT III 1000V.
- Dimensões: 190(A) x 88,5(L) x 27.5(P)mm.
- Peso: Aprox. 422g (incluindo bateria).

TENSÃO DC

- Faixas: 200mV, 2V, 20V, 200V, 1000V.
- Precisão: 200mV ~ 200V $\pm(0.5\%+3D)$.
1000V $\pm(0,8\%+10D)$.
- Resolução: 0.1mV, 1mV, 10mV, 100mV, 1V.
- Impedância de Entrada: 10M Ω .
- Proteção de Sobrecarga:
250V DC/ Pico AC para faixa de 200mV.
1000V DC/ 750V Pico AC para outras faixas.

TENSÃO AC

- Faixas: 200mV, 2V, 20V, 200V, 750V.
- Precisão: 200mV ~ 200V $\pm(0.8\%+5D)$.
750V $\pm(1.2\%+10D)$.
- Resolução: 0,1mV, 1mV, 10mV, 100mV, 1V.
- Impedância de Entrada: 10M Ω .

-
- Resposta em Frequência: 40Hz ~ 1kHz.
 - Sensibilidade: Valor eficaz para uma onda senoidal (RMS).
 - Proteção de Sobrecarga:
 - 250V DC/ Pico AC para faixa de 200mV.
 - 1000V DC/ 750V Pico AC para outras faixas.

CORRENTE DC

- Faixas: 200 μ A, 2mA, 20mA, 200mA, 20A.
- Precisão: 2mA ~ 200mA $\pm(0.8\%+10D)$.
20A $\pm(2.0\% + 5D)$.
- Resolução: 0,1 μ A, 1 μ A, 10 μ A, 100 μ A, 10mA.
- Queda de Tensão: Máximo 200mV.
- Corrente Máxima: 20A (tempo de teste menor que 10 segundos para medida na faixa de 20A).
- Proteção de Sobrecarga:
 - Fusível (de Auto Restauração) de 0,2A/ 250V para entrada mA.
 - Fusível (de Ação Lenta) de 20A/ 250V para entrada 20A.

CORRENTE AC

- Faixas: 2mA, 20mA, 200mA, 20A.
- Precisão: 2mA ~ 20mA $\pm(1.0\%+15D)$.
200mA $\pm(2.0\%+15D)$.
20A $\pm(3.0\%+20D)$.
- Resolução: 1 μ A, 10 μ A, 100 μ A, 10mA.
- Queda de Tensão: Máximo 200mV.
- Corrente Máxima: 20A (tempo de teste menor que 10 segundos para medida na faixa de 20A).
- Resposta em Frequência: 40Hz ~ 400Hz.
- Sensibilidade: Valor eficaz para uma onda senoidal (RMS).
- Proteção de Sobrecarga:
 - Fusível de Auto Restauração de 0,25A/250V para entrada mA. Fusível ϕ 4mm x 19mm
 - Fusível de Ação Lenta de 20A/250V para entrada 20A. Fusível ϕ 4mm x 19mm

RESISTÊNCIA

- Faixas: 200 Ω , 2k Ω , 20k Ω , 200k Ω , 2M Ω , 20M Ω , 200M Ω .
- Precisão: 200 Ω $\pm(0.8\%+5D)$.
2k Ω ~ 2M Ω $\pm(0.8\%+3D)$.
20M Ω $\pm(1.0\%+25D)$.
200M Ω $\pm(5,0\%+30D)$.
- Resolução: 0.1 Ω , 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , 1k Ω , 10k Ω e 100k Ω .
- Tensão de Circuito Aberto: < 3V.
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/Pico AC.

CAPACITÂNCIA

- Faixas: 20nF, 200nF, 2 μ F, 20 μ F, 200 μ F, 2000 μ F.
- Precisão: 20nF ~ 20 μ F \pm (3,5%+20D).
200 μ F ~ 2000 μ F \pm (5.0%+10D).
- Resolução: 10pF, 100pF, 1nF, 10nF, 100nF, 1 μ F.
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC / Pico AC.

FREQUÊNCIA

- Faixas: 10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHz, 10MHz.
- Precisão: \pm (1.0%+3D).
- Resolução: 0,01Hz, 0,1Hz, 1Hz, 10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz.
- Sensibilidade de Entrada: 1V RMS.
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/Pico AC (acima de 10V RMS máx 10s).

TESTE DE CONTINUIDADE

- Faixa: Continuidade.
- Limiar: (50 \pm 20) Ω .
- Tensão de Circuito Aberto: Aprox. 3V.
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/Pico AC.

TESTE DE DIODO

- Faixa: Diodo.
- Descrição: Display mostra a queda de tensão aproximada do diodo.
- Corrente de Teste: Aprox. 1mA.
- Tensão Reversa: Aprox. 3V.
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/Pico AC.

INDUTÂNCIA

- Faixas: 2mH, 20mH, 200mH, 2H, 20H.
- Precisão: \pm (2.5%+30D).
- Resolução: 1 μ H, 10 μ H, 100 μ H, 1mH, 10mH.
- Frequência de Teste: 100Hz.
- Proteção de Sobrecarga: 36V DC/Pico AC.

TESTE DE TRANSISTOR (hFE)

- Faixa: 0 ~ 1000.
- Corrente de Base: 10 μ A DC.
- Vce: 3V DC.

TEMPERATURA

- Faixa: (-20~1000)°C,(0~1832)°F
- Precisão: (-20~400)°C ± (1,0%+5D).
(400~1000)°C ± (1,5%+15D).
(0~750)°F ± (0,75%+5D).
(750~1832)°F ± (1,5%+5D).
- Resolução: 1°C/1°F
- Precisão do tempoar incluso: ±0,75% ou 2,2°C.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO

PESQUISA SOBRE CONSUMO DE ENERGIA DE EQUIPAMENTOS APLICADA ATRAVÉS DA FERRAMENTA GOOGLE FORMULÁRIOS.

Título da pesquisa: Automação residencial objetivando a eficiência energética.

(1) Qual o tipo do domicílio?

CASA APARTAMENTO OUTRO.

(2) Área construída, em [m²]:

até 50 51 a 75 76 a 100 101 a 150 151 a 200 acima de 200 não sabe.

(3) Quantas pessoas moram no domicílio?

1 2 3 4 5 mais que 5.

(4) Qual a média mensal de Consumo de Energia?

Não sabe menos que 50 kWh Até 100 kWh Até 150 kWh Até 200 kWh

Mais que 200 kWh.

(5) Seus equipamentos de internet, computadores, carregadores de celular, televisores, rádios, micro-ondas, máquinas de lavar ficam conectados sempre na tomada?

SIM NÃO.

(6) Você sabia que aparelhos em stand by podem representar até cerca de 13% do consumo de energia de uma residência?

SIM NÃO.

(7) Você compraria um equipamento que eliminasse o stand by?

Não compraria Não compraria: responsabilidade dos fabricantes Compraria, depende do preço Compraria, pelo retorno financeiro.

(8) Se todo consumo elétrico de sua residência fosse acompanhado pelo seu celular em tempo real, seria mais fácil economizar energia?

SIM NÃO.

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA EM RIO DOS CEDROS, SANTA CATARINA

Feasibility study for implementation of a hydroelectric generator center in Rio dos Cedros, Santa Catarina

Paulo Sergio Sevegnani ¹
Julia Grasiela Busarello Wolff ²

Resumo: O Brasil é composto por uma matriz energética diversificada, com destaque na geração de energia hidráulica devido à rica hidrografia presente. A demanda por energia no país possui uma tendência de crescimento. Entretanto, ainda há diversas barreiras que acabam atrasando e não tornando os investimentos atrativos nesse meio. Por possuir um sistema elétrico interligado, um tema muito discutido é a geração distribuída, que tem como objetivo aproximar as fontes de geração dos centros de cargas, reduzindo boa parte dos investimentos necessários. As centrais geradoras hidráulicas (CGH) são apresentadas como uma das alternativas para esse problema. Com um território rico em rios, a matriz energética predominante é a matriz advinda de fontes hidráulicas, porém menos da metade desse potencial é explorado. Algumas medidas tomadas pelos órgãos públicos vêm trazendo uma maior visibilidade e atratividade para esses tipos de empreendimentos. O rio dos Cedros, pertencente à bacia hidrográfica do rio Itajaí, não possui características para implantação de grandes usinas de geração, mas é um local onde podem ser instaladas usinas de menor porte ao longo de seu leito, como as CGH's.

Palavras-chave: Aproveitamento hidráulico. Turbina hidráulica. Geração de energia.

Abstract: Brazil is composed of a diversified energy matrix, with a greater prominence in the generation of hydraulic energy, due to a rich hydrography present. Demand for energy in the country has a growing trend, however, there are still several barriers that end up delaying and not making investments attractive in this environment. Because it has an interconnected electrical system, a much discussed topic is distributed generation, which aims to approximate the sources of generation of the load centers, reducing much of the necessary investments. Hydraulic power plants (CGH) are one of the alternatives for this problem. With a territory rich in rivers, the predominant energy matrix is hydraulic sources, but less than half of this potential is explored. Some measures taken by public agencies have brought greater visibility and attractiveness to these types of enterprises. The Dos Cedros' river, which belongs to the Itajaí river basin, does not have characteristics for the implantation of large generation plants, however, it is a place where smaller plants can be installed along its bed, such as CGH's.

Keywords: Hydraulic utilization. Hydraulic turbine. Power generation.

Introdução

O Brasil é um país composto por diversas fontes de energia, tanto fósseis quanto renováveis. As renováveis compõem grande parte da matriz nacional incentivada, principalmente pela geração hidráulica, devido ao favorecimento hidrológico. No entanto, o potencial instalado representa uma parcela muito pequena quando comparado ao número de rios que podem ser aproveitados para a geração de energia elétrica.

A geração hidráulica é dividida em três tipos: UHE (usina hidrelétrica), PCH (pequena central hidrelétrica) e CGH (central geradora hidrelétrica). São caracterizados, principalmente, pela capacidade de geração e área de reservatório.

^{1, 2} Centro Universitário Leonardo Da Vinci – UNIASSSELVI – Rodovia BR 470 – Km 71 – nº 1.040 – Bairro Benedito – Caixa Postal 191 – 89130-000 – Indaial/SC. Fone (47) 3281-9000 – Fax (47)3281-9090 E-mail: jacksoncampestrini@hotmail.com; julia.wolff@uniasselvi.com.br.

A CGH, tema abordado neste trabalho, é uma usina com capacidade de geração de até 5.000 kW. Determinado tipo de aproveitamento de potencial hidráulico está dispensado de concessão, permissão ou autorização. O interessado deverá apenas comunicar ao poder concedente (ANEEL).

Os investimentos em geração de energia renovável vêm ganhando destaque, principalmente pelos incentivos governamentais e ações regulatórias que viabilizaram os sistemas de compensação de energia produzida excedente por sistemas de micro e minigeração (EPE, 2017).

A usina poderá registrar-se nos sistemas de compensação de energia ou também comercializar no mercado de energia: mercado livre (ACL), leilões de energia (ACR) ou geração distribuída (GD).

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de viabilidade para implantação de uma central geradora hidrelétrica no rio dos Cedros, trecho situado na cidade de mesmo nome. O estudo abordará as informações necessárias e uma estimativa de custos de implantação, para que, com as informações apresentadas, tenha-se o conhecimento se o local é propício e viável para a implantação da CGH.

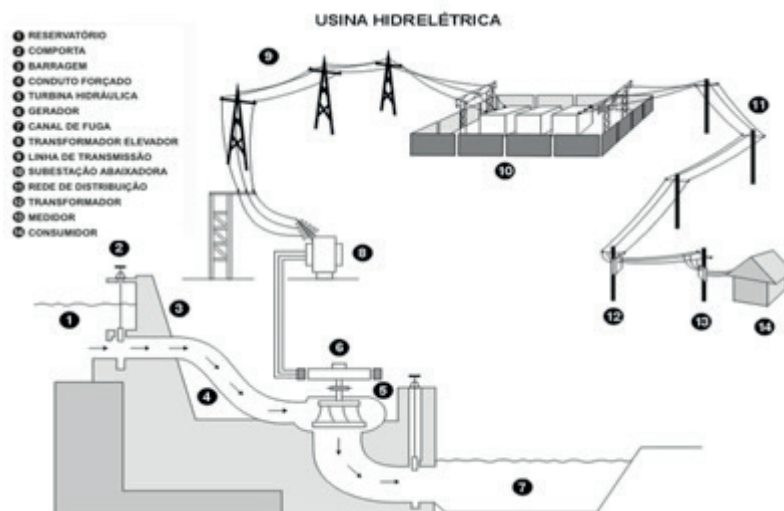
Ainda, foi realizado um cálculo estimativo do potencial hidráulico do rio. Foi escolhido o tipo de usina, bem como os equipamentos necessários. Por fim, foram descritos os cálculos matemáticos e financeiros, os quais permitem analisar e demonstrar a viabilidade ou não do negócio.

Geração hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é caracterizada como uma instalação que tem como objetivo a conversão de energia mecânica em energia elétrica. O aproveitamento hidráulico transformado em energia elétrica é medido pela vazão e altura da queda e, assim, pode ser medido o potencial de geração da usina.

Para obter um cenário favorável para a geração de energia, diversos arranjos podem ser utilizados, como o desnível natural do leito de um rio, encontrado em uma cachoeira; a construção de um represamento de água, que criará um diferencial de altura de queda artificial ou, também, desviando parte do leito de um rio em determinado trecho e retomando esse desvio em algum trecho em frente, buscando uma altura de queda favorável entre a montante e a jusante. A instalação de uma usina hidrelétrica é composta por diversos fatores.

Figura 1. Funcionamento do sistema de geração de energia



Fonte: Furnas (2017).

É mostrado um sistema simplificado do processo de geração de energia. Temos, no item 1, o reservatório de água. O item 2 é composto pelas comportas da barragem, item 3. O item 4 representa os condutos que levam a água até as turbinas, item 5. As turbinas são utilizadas para poderem proporcionar energia mecânica ao gerador, item 6, responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica.

O item 7 representa a continuação do leito do rio e o item 8 é o transformador elevador, que aumentará os níveis de tensão para patamares elevados, para que a energia gerada possa ser transportada por grandes distâncias pelas linhas de transmissão, item 9.

Em locais próximos aos centros de consumo, são instaladas as subestações abaixadoras, item 10, que diminuirão os níveis de tensão para as linhas de distribuição, item 11. O item 12 é responsável por rebaixar a tensão de distribuição em níveis de tensão de consumo. Ainda, o item 13 é o medidor do consumidor e, por fim, o item 14 são as cargas do cliente (FURNAS, 2017).

Ciclo hidrológico

A disponibilidade hídrica de um rio é definida pelas vazões mínimas e médias, que são analisadas pelos postos de medição ao longo de um determinado período e em determinado trecho do rio. Essas informações são essenciais para que façamos um estudo e planejamento para implantação de construções que utilizam esse recurso e para que não conflitem ou prejudiquem o leito desse, interferindo em outros pontos ao decorrer do rio.

A disponibilidade hídrica determina a vazão do rio, que pode ser utilizada para exercer determinadas atividades, como o uso para geração de energia elétrica, sem prejudicar o sistema ecológico do local.

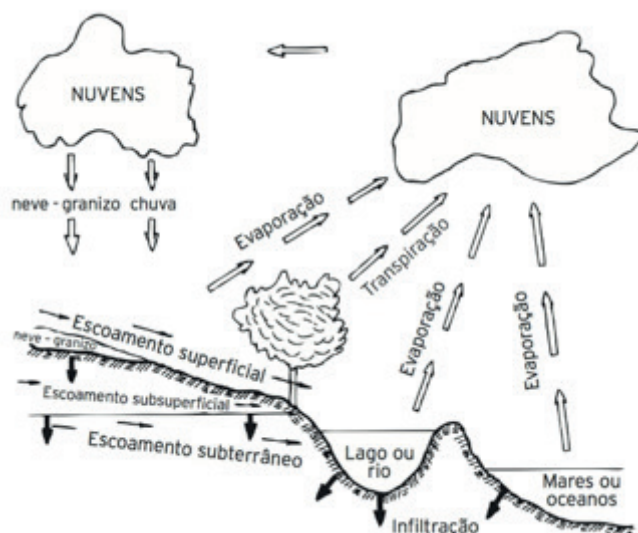
Diversos métodos podem ser utilizados para determinar a disponibilidade hídrica de uma bacia. Como exemplo, há o método de curva de permanência, que analisa a disponibilidade através do histórico da bacia e quantas vezes a situação ocorre, pois ora a bacia pode passar por períodos de escassez, ora pode passar por períodos de grandes cheias, causando uma curva de variação muito grande entre os períodos analisados isoladamente.

A geração de energia elétrica é considerada uma fonte de geração renovável, pois conforme a ocorrência do ciclo hidrológico, o processo de geração vai se repetindo a partir do ciclo natural da água.

O conhecimento da hidrologia do local é um fator muito importante para a implantação de uma usina hidrelétrica. Os valores de vazão do rio e variação da altitude definem a capacidade de geração da usina.

Outro ponto importante é a análise da bacia hidrográfica do local, verificando-se alguns pontos, tais como: a área, o relevo, o tipo do solo e também se, no percurso, existem represamentos ou outros meios de utilização da água do rio.

Figura 2. Ciclo hidrológico



Fonte: Simone (2010).

Tipos de usina

As usinas hidrelétricas podem ser de acumulação de água, de fio d'água ou reversíveis. As usinas de acumulação de água são caracterizadas por seu reservatório, que armazena a água e possibilita realizar o controle da vazão que chega até as turbinas hidráulicas. Grande parte das usinas hidrelétricas é do tipo de acumulação, pois dessa forma consegue-se garantir uma geração regularizada durante as diferentes épocas do ano.

As usinas do tipo acumulação podem ainda ser classificadas em derivação. A montante de água é retirada de um determinado rio e levada até as turbinas, para então ser devolvida para outro rio. Há também as usinas de desvio, as quais captam a água em um determinado rio, desviam parcialmente o recurso e, após o processo, a água segue a trajetória pelo mesmo rio (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

As usinas que operam por fio d'água não possuem reservatório de água e utilizam a própria vazão disponibilizada pelo rio para poderem gerar energia. Essa vazão não é regularizada, pois depende exclusivamente da vazão disponível no rio. Logo, em momentos em que o rio está abaixo do nível adequado, a quantidade de energia gerada nessa usina é diretamente prejudicada (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

As usinas reversíveis utilizam dois reservatórios, um superior e um inferior, e objetivam criar uma estabilidade no sistema elétrico de geração, contudo envolvem custos maiores de implantação e manutenção (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Nos períodos de demanda máxima do sistema elétrico, com valor financeiro mais elevado, a usina utiliza a água presente no reservatório superior para gerar energia e atender às necessidades.

A água utilizada é enviada ao reservatório inferior e permanece ali até a chegada dos períodos de demanda mínima, cujo valor financeiro da energia é menor. Ainda, aproveita-se para bombear a água do reservatório inferior até o superior e o ciclo se repete (SEMINÁRIO DE USINAS REVERSÍVEIS, 2014).

Turbinas hidráulicas

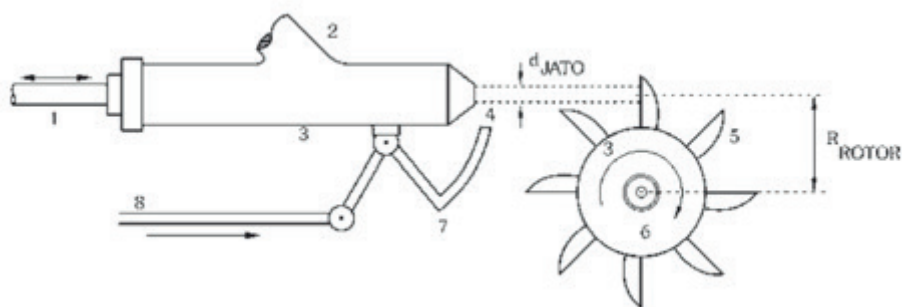
As turbinas hidráulicas são máquinas que convertem a energia mecânica-hidráulica da água em energia mecânica-motriz. Elas recebem a água através dos condutos forçados que, ao entrarem em contato com as pás, geram o movimento motriz. As turbinas dividem-se em duas grandes famílias, que são as turbinas de ação e as turbinas de reação.

As turbinas de ação trabalham recebendo jatos de água paralelamente ao seu eixo. A água pode penetrar por toda a periferia da turbina e as pressões de entrada são iguais às pressões de saída.

As turbinas de reação podem ser axiais ou radiais, dependendo do modelo escolhido, e a pressão de entrada é maior do que a pressão de saída. As turbinas hidráulicas mais utilizadas concentram-se nos tipos: Pelton (turbina de ação), Francis (turbina de reação) e Kaplan (turbina de reação) (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

A turbina tipo Pelton é uma turbina de jato composta pelo bocal, por onde é expelido um jato de água. Esse jato é guiado em direção às pás do rotor que, através do jato, gira seu eixo acoplado ao eixo do gerador.

Figura 3. Turbina Pelton



Fonte: Simone (2010).

O rotor possui diversas pás dispostas ao longo da circunferência e os jatos de água podem ser expelidos de um a seis bocais, com o intuito de poderem aumentar a potência de geração (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

O rotor de uma turbina Pelton é constituído por diversas conchas, que possuem um formato de duas colheres moldadas uma ao lado da outra, formando um septo divisor no centro, local que recebe o jato d'água advindo do bico injetor (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

O bico injetor de uma turbina Pelton, localizado no final do conduto forçado, despacha um jato d'água em uma direção tangencial ao rotor da turbina. A turbina possui uma agulha, que é comandada pelo eixo do servomotor de controle, que regula a vazão do bico e, por consequência, regula a potência da turbina (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Tabela 1. Componentes da turbina Pelton

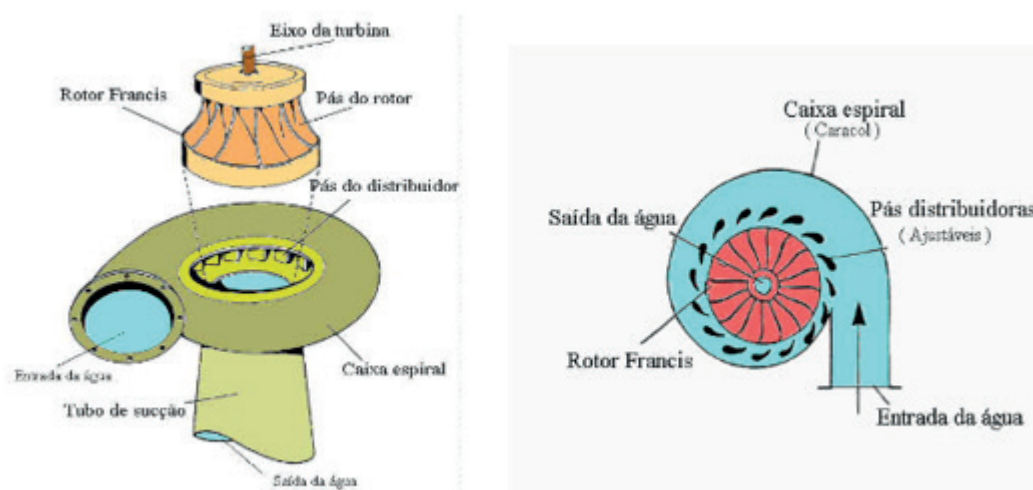
Item	Descrição	Item	Descrição
1	Eixo do servomotor de controle	5	Concha ou pá Pelton
2	Tubulação forçada	6	Rotor Pelton
3	Injetor de água	7	Desviador do jato
4	Jato de água	8	Comando de desviador

Fonte: Simone (2010).

A turbina mostrada é uma turbina do tipo Francis, que é constituída por uma caixa espiral, um distribuidor, um receptor e um tubo de sucção. A caixa espiral possui um formato semelhante ao formato de um caracol e traz a água dos condutos forçados para dentro da turbina.

O distribuidor consiste em pás orientáveis instaladas ao redor do rotor, com a finalidade de ajustar o ângulo de entrada da água nas pás do rotor, proporcionando um melhor rendimento. O receptor, também chamado de rotor, é o item principal do conjunto. Nele é recebida a força hidráulica da água, que é convertida em energia mecânica e o eixo do rotor Francis, interligado ao eixo do gerador. O tubo de sucção é a saída da água da turbina que, após o processo, é enviada ao canal de fuga (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

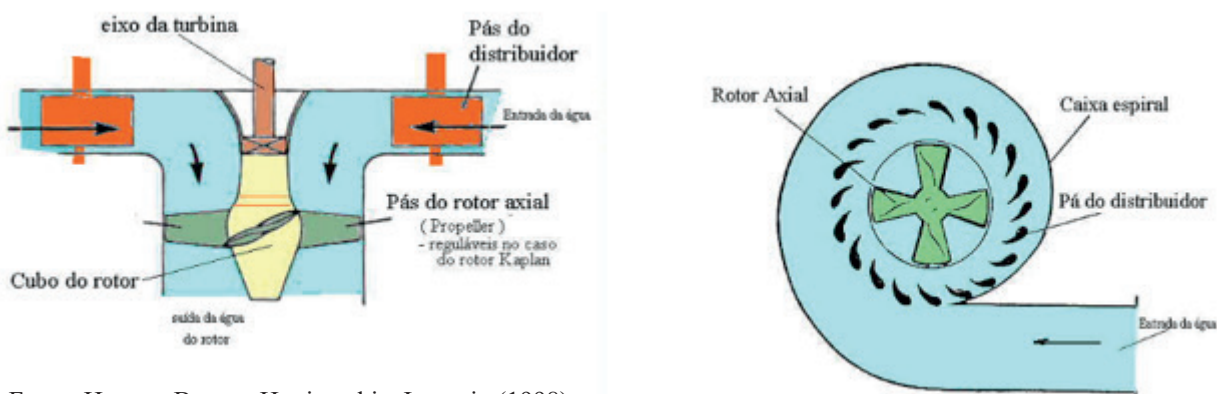
Figura 4. Turbina Francis



Fonte: Harvey, Brown, Hettiarachi e Inversin (1998).

As turbinas do tipo Kaplan são semelhantes às hélices de um navio, compostas pelas pás fixadas na circunferência do rotor. Possuem, assim como a turbina Francis, as pás de distribuição para poderem proporcionar um melhor rendimento da turbina. São muito utilizadas em pequenas quedas. Esse tipo de turbina possui vantagens, como o baixo custo de fabricação e simplicidade na instalação (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Figura 5. Turbina Kaplan

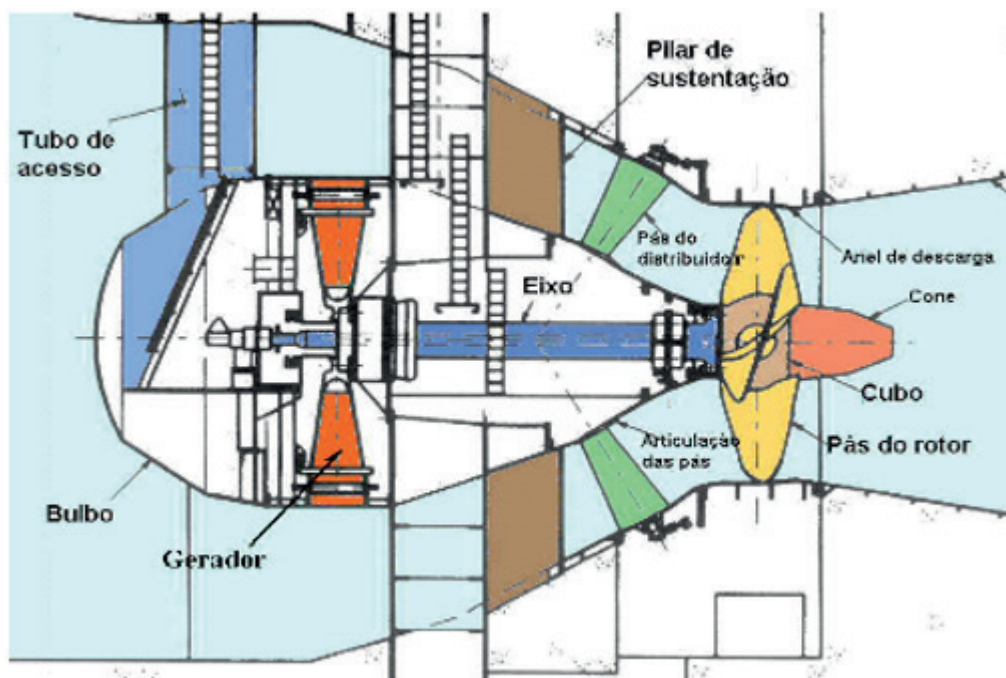


Fonte: Harvey, Brown, Hettiarachi e Inversin (1998).

Há também a turbina do tipo bulbo, considerada uma versão compacta da turbina de tipo Kaplan. São instaladas horizontalmente dentro do tubo adutor de água, possuem pás orientáveis, assim como as do tipo Kaplan, e uma espécie de bulbo blindado.

Dessa forma, esse tipo de turbina ocupa um espaço menor e dispensa o uso da caixa em caracol e do trecho de descida vertical. O custo de implantação do equipamento é menor e são utilizadas, principalmente, em aproveitamentos hidráulicos de baixa queda e usina tipo fio d'água (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Figura 6. Turbina Bulbo



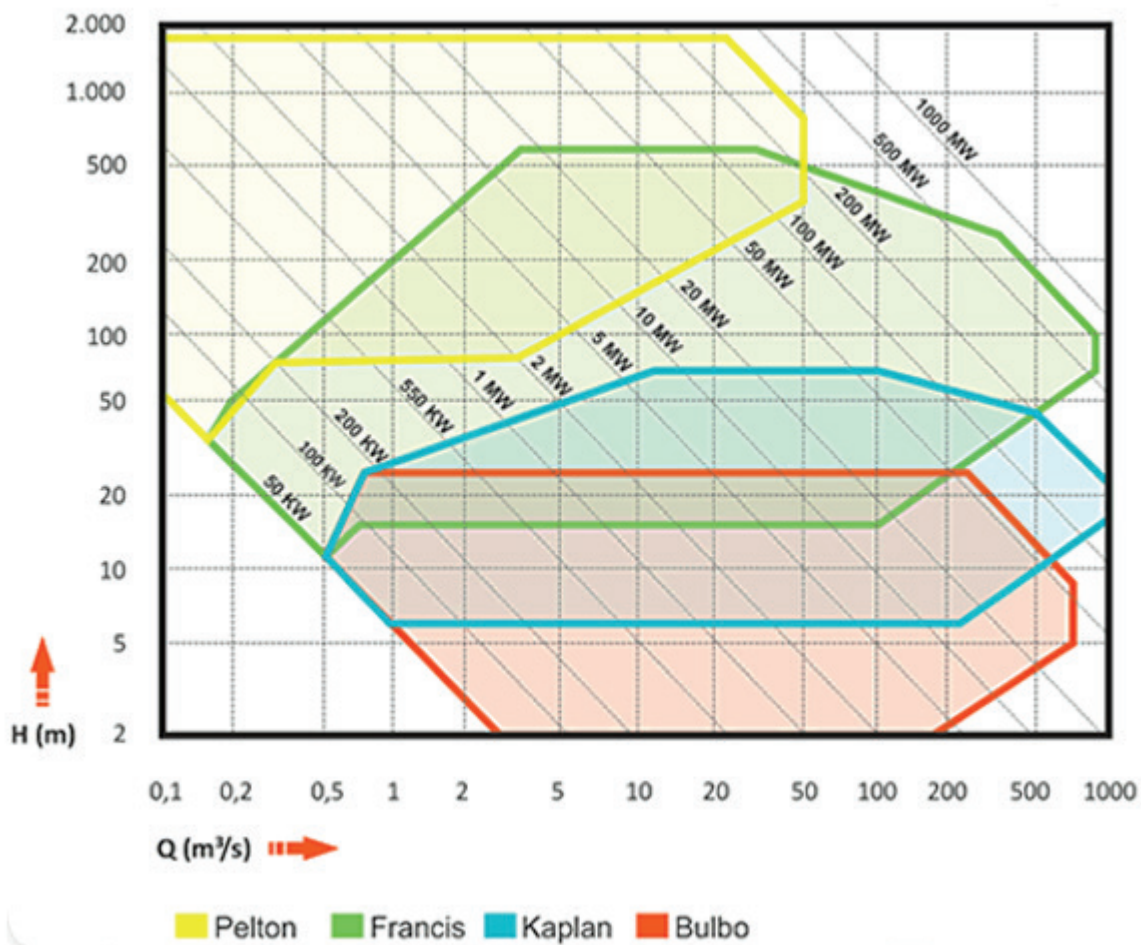
Fonte: Harvey, Brown, Hettiarachi e Inversin (1998).

Além dos tipos de turbinas supracitados, existem muitos outros com características específicas, cabendo, ao desenvolvimento do projeto, um aprofundamento maior. Outros exemplos de tipos de turbina são: turbinas hélices, turbinas tubulares, turbinas straflo, dentre outros (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

Para a determinação do melhor tipo de turbina a ser aplicado para uma usina de geração hidrelétrica, devemos levantar os dados do rio. A relação entre os valores de vazão do rio e a altura de queda d'água serão os fatores que irão auxiliar na determinação do tipo de turbina a ser aplicado na usina.

A figura a seguir mostra o campo de aplicação dos principais tipos de turbinas, levando em consideração a altura de queda, a vazão disponível no leito do rio e a potência a ser gerada.

Figura 7. Campo de aplicação dos tipos de turbinas

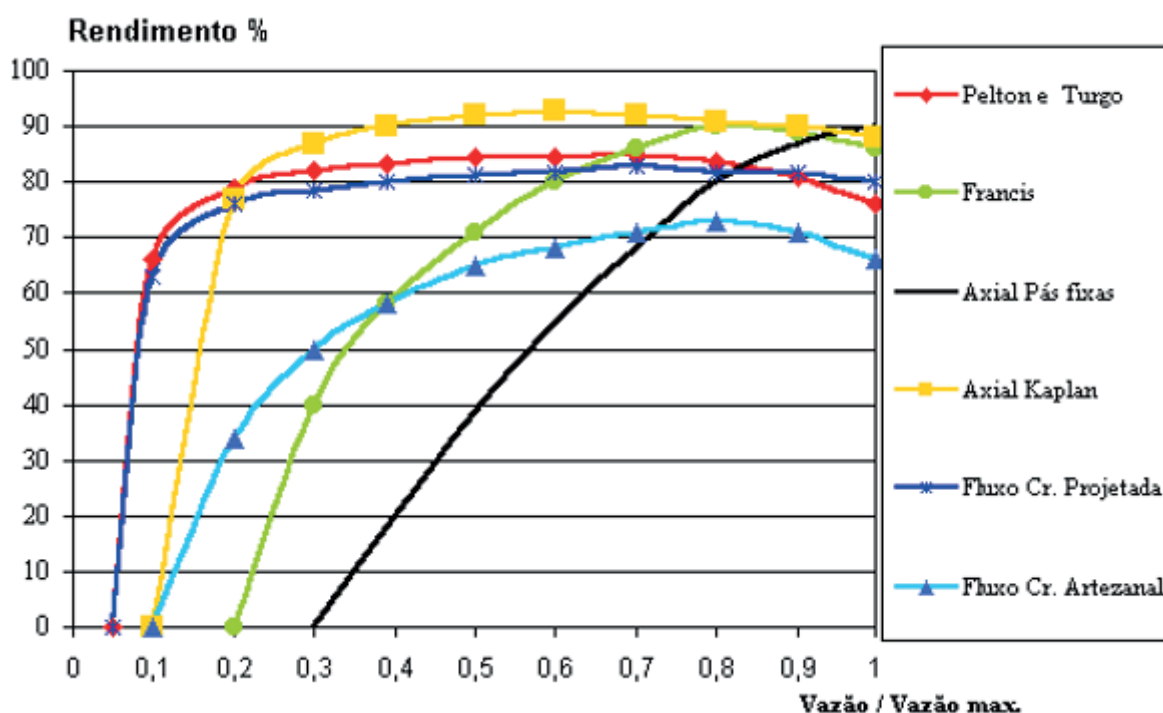


Fonte: Adaptado de Hacker (2017).

Outro fator importante para a escolha das turbinas é a regularidade da vazão do rio que, dependendo do modelo escolhido, pode acarretar em uma perda muito acentuada no rendimento do sistema.

Na próxima figura é apresentado um gráfico com o rendimento dos tipos de turbina de acordo com a regularidade da vazão do rio. Como podemos notar, as turbinas do tipo Francis, axial de pás fixas e fluxo Cr. Artesanal apresentam bons rendimentos apenas quando atingem um determinado percentual de vazão. Já as turbinas do tipo Pelton, Tugo, axial Kaplan e de fluxo Cr. Projetado possuem um rendimento mais constante em relação à regularidade da vazão do rio.

Figura 8. Rendimento dos modelos de turbina



Fonte: Harvey, Brown, Hettiarachi e Inversin (1998).

Gerador síncrono

Os geradores síncronos são as máquinas elétricas mais utilizadas na geração de energia no Brasil. Essas máquinas possuem uma velocidade angular constante, bem como a tensão gerada e a corrente elétrica ajustáveis.

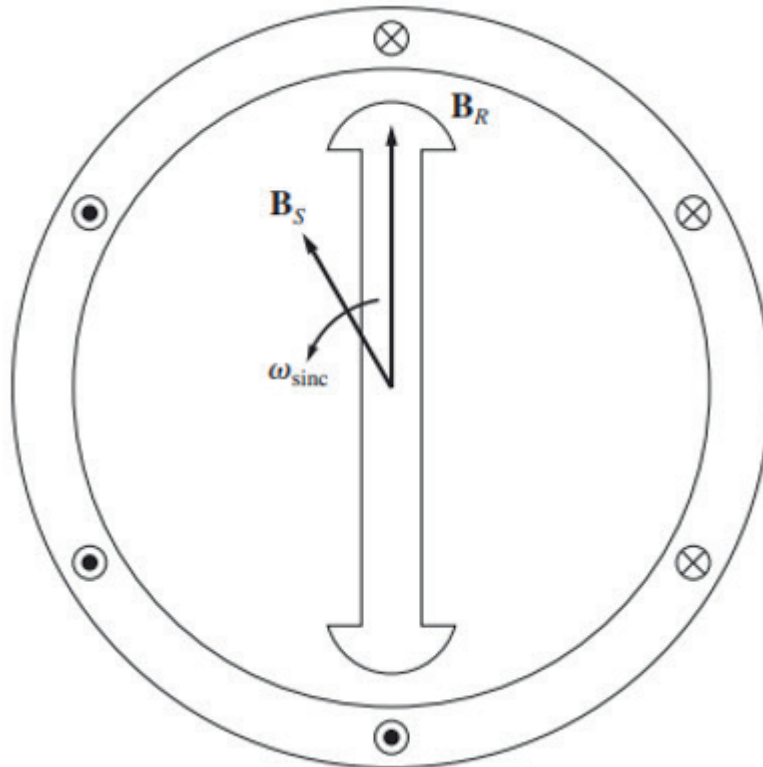
O estator de um gerador e de um motor constitui a parte fixa, é construído com chapas empilhadas de material ferromagnético e possui diversas ranhuras para inserção dos enrolamentos de armadura. O rotor é o item central do gerador. Quando em rotação, gera um campo magnético igual aos polos presentes no estator.

As máquinas síncronas podem ser chamadas de alternadores e, quando confeccionadas para tal, geram tensões alternantes senoidais, plasmadas em uma frequência f_s constante. Frequência **essa ligada à velocidade angular do rotor e ao número de seus polos, que é igual ao número de seus polos do enrolamento depositado no esta-**

tor (enrolamento de armadura) (SIMONE, 2010, p. 22).

A figura a seguir mostra um estator e um rotor de um gerador de dois polos. O rotor desse gerador é acoplado ao eixo da turbina hidráulica, que proporciona a energia mecânica-motriz ao conjunto turbina-gerador.

Figura 9. Gerador de dois polos



Fonte: Chapman (2013).

Matriz energética

A geração de energia é um fator determinante para o crescimento de um país e essa busca, aliada às questões ambientais, objetiva o aumento das fontes renováveis como opção de geração de energia.

No ano de 2016, as usinas de mini e microgeração tiveram grande destaque, principalmente pelos incentivos governamentais e ações regulatórias, que as tornaram uma opção de investimento mais atrativa.

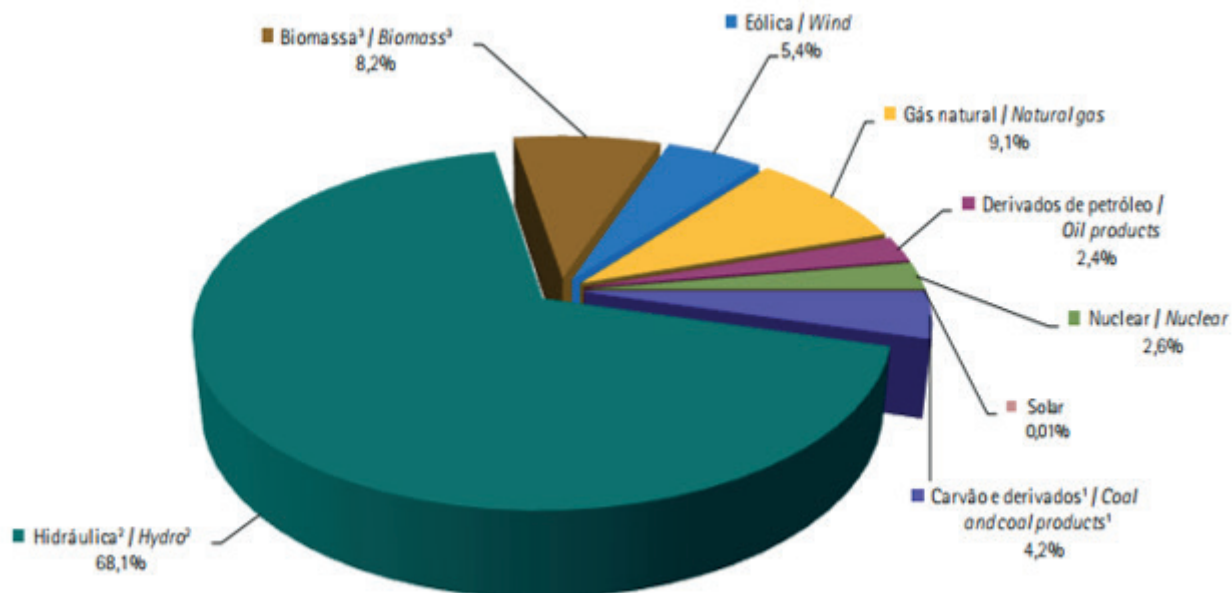
A minigeração distribuída alcançou uma potência instalada total de 72,4 MW, destacando-se os sistemas de geração fotovoltaicos, que contribuíram com 56,9 MW da potência instalada (EPE, 2017).

No Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica ainda acontece pelo setor público, o que representa um total de 83% da capacidade. Ainda, a principal fonte energética nacional é a hidráulica, que demonstrou um crescimento de 5,9% em relação ao ano anterior. A produção de energia do setor privado, ou seja, os autoprodutores, atingiu uma marca de 17%, representando

um crescimento de 0,4% em relação ao ano anterior (EPE, 2017).

A figura a seguir demonstra a distribuição das fontes de geração do Brasil, destacando-se, principalmente, a fonte hidráulica, que representa um total de 68,1% da matriz energética.

Figura 10. Matriz energética do Brasil



Fonte: EPE (2017).

Em 2016, o Brasil sofreu uma perda na oferta interna de energia e uma diminuição no consumo final em relação ao ano anterior. Em 2015, a oferta interna de energia alcançou 299,6 Mtep e teve uma contração de 3,8% para 2016, atingindo a marca de 288,3 Mtep. Ainda, o consumo final registrou queda de 2,2% em 2016 em relação ao ano de 2015.

Apesar disso, obteve-se uma redução de perdas na transformação de energia, pois houve uma diminuição na geração térmica e derivados de petróleo e um aumento na capacidade de geração de fontes eólicas e hidráulicas. As fontes de energia renováveis do Brasil possuem uma participação na matriz energética, que está entre as mais elevadas do mundo (EPE, 2017).

Tabela 2. Participação das fontes de geração no Brasil

Fonte (Mtep)	2015	2016	Δ16/15
Renováveis	123,7	125,3	1,4%
Energia hidráulica	33,9	36,3	7,0%
Biomassa da cana	50,6	50,3	-0,7%
Lenha e carvão vegetal	24,9	23,1	-7,2%
Eólica	1,9	2,9	54,9%
Solar	0,005	0,007	44,7%
Lixívia e outras renováveis	12,4	12,8	3,4%
Não renováveis	175,9	163,0	-7,3%
Petróleo e derivados	111,6	105,4	-5,6%
Gás natural	41,0	35,6	-13,2%
Carvão mineral	17,6	15,9	-9,7%
Urânio (U ₃ O ₈)	3,9	4,2	9,2%
Outras não renováveis	1,8	1,9	5,2%

Fonte: EPE (2017).

Os planos de crescimento energético do país estão fortemente ligados ao uso racional da energia elétrica, além da busca por aumento das fontes renováveis e diminuição das fontes fósseis. O uso eficiente da energia também é um fator importante e as autoridades competentes do setor estão buscando e planejando intensificar as ações (EPE, 2016).

A preocupação com questões de eficiência energética surgiu quando ocorreu um aumento brusco nos preços do petróleo por volta do ano de 1970. Tomou-se o conhecimento de que os preços dos combustíveis iriam ano a ano aumentar. Logo, adotou-se, também, um pensamento de que quanto menos usar, menos valor com energia seria gasto (EPE, 2016).

No Brasil, a busca pela eficiência energética iniciou sua sistematização há aproximadamente 20 anos. Contudo, diversos fatores precisam ser alcançados, tais como o fator de caráter técnico, que se preocupa em criar alternativas ou melhorar o rendimento do consumo; de caráter econômico, que fará as análises de custo e benefício do investimento e o tempo de retorno e, ainda, de caráter de mercado (EPE, 2016).

Geração distribuída

A geração distribuída é caracterizada pela instalação de centrais de geração próximas aos centros de carga. Geralmente, as centrais de geração distribuída são de fontes renováveis, porém podem ser também de combustíveis fósseis.

A construção de geradores próximos às cargas traz diversos benefícios ao sistema interligado nacional - SIN, bem como traz desvantagens também. Dentre os benefícios estão a postergação dos investimentos com linhas de transmissão, subestações elevadoras, subestações abaixadoras e baixo impacto ambiental.

As desvantagens desse tipo de sistema estão relacionadas ao aumento da complexidade para equilibrar, controlar e efetuar as devidas proteções do sistema e aos métodos de cobrança

da energia consumida.

O processo para que uma central de mini ou microgeração possa acessar a rede é simples e rápido e o acessante deverá entregar a documentação para a concessionária responsável atuante na região geográfica onde há a intenção de instalar o sistema de geração.

Primeiramente, o interessado deverá entregar a solicitação de acesso para a concessionária, conforme documentação anexada no módulo 3 do PRODIST. Ainda, terá um prazo de 15 dias para a microgeração e de 30 dias para a minigeração para retornar ao acessante com o parecer de acesso informando as condições de acesso e requisitos técnicos.

Entretanto, caso haja alguma necessidade de ampliação ou melhoria na rede, os prazos para o retorno com o parecer de acesso dobram, pois a acessada deverá apresentar, junto com o parecer, o orçamento para melhoria da rede, bem como as memórias de cálculo.

Após o retorno da concessionária, o acessante instala a central de geração e, em um prazo de até 120 dias, deve solicitar a vistoria das instalações para a concessionária, que, por sua vez, deverá realizar esta em até sete dias e entregar o relatório das possíveis pendências em até cinco dias. Após realizadas as adequações, a concessionária deverá aprovar a instalação em até sete dias.

O sistema de compensação de energia elétrica atribuído à micro e minigeração permite que a unidade consumidora injete na rede os excedentes de energia gerados, de forma a gerar créditos para si, que poderão ser utilizados por outra unidade consumidora e, também, pela mesma unidade consumidora, obedecendo ao prazo limite de 60 dias de validade. Segundo o Portal Light (2018, s.p.), outros métodos são legalmente possíveis para utilizar esses créditos em outras unidades consumidoras, localizadas na mesma área de concessão da concessionária em questão, como:

Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão por meio de consórcio ou cooperativa. É composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, nas quais a energia excedente será compensada.

Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma pessoa jurídica, incluídas matriz e filial, ou pessoa física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (condomínios): caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.

Para as unidades consumidoras, devemos realizar o balanço entre a quantidade de energia gerada versus a quantidade de energia consumida. Para os consumidores do grupo B, ou seja, para as unidades ligadas em baixa tensão, devemos tomar conta de que mesmo que a quantidade de energia gerada seja maior do que a energia consumida, ainda devem pagar um valor referente ao custo de disponibilidade fornecido pela concessionária, cujos valores são equivalentes a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). Para os con-

sumidores do grupo A, alta tensão, não se aplicam essas regras, porém devem arcar com os valores referentes à demanda contratada.

No sistema de compensação, a energia gerada é levada ao quadro geral de energia que será consumida e o excedente será enviado para a rede da concessionária, passando pelo medidor bidirecional. Este faz o controle da quantidade de energia gerada *versus* energia consumida.

Central geradora hidrelétrica

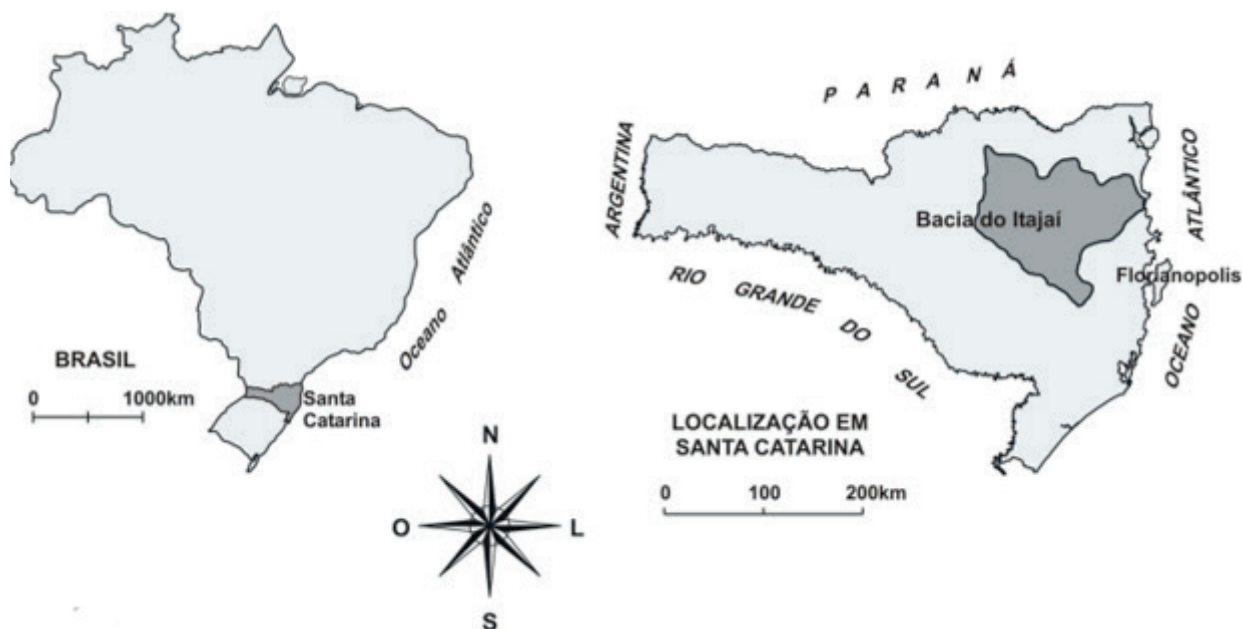
Uma CGH é considerada uma fonte de geração de energia limpa, renovável e altamente rentável, pois seu recurso primário, a água, não necessita de grandes gastos para a manutenção e obtenção, já que a usina de geração hidrelétrica se instala ao longo do rio.

Esses tipos de usinas emitem pouquíssimos gases do efeito estufa quando comparados a outras fontes de geração, como as usinas termelétricas. Não geram resíduos poluentes que necessitam ser armazenados e tratados, como gás metano e resíduos radioativos.

Os custos de produção de uma central geradora hidrelétrica são constantes. Por não serem de origem fóssil, são imunes às oscilações de mercado geradas pelo aumento dos preços de combustíveis, como gasolina e diesel, e também às variações cambiais. Assim, as centrais geradoras hidrelétricas são apresentadas como um excelente investimento devido à crescente demanda por energia elétrica (EPE, 2016).

A CGH, objeto de estudo do presente trabalho, está situada no Estado de Santa Catarina, na bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Figura 11. Localização da Bacia do Itajaí



Fonte: Soares et al. (2010).

Tabela 3. Dados do rio dos Cedros

Descrição	Vazão (m ³ /s)	Série observada
Vazão mínima	2,70	1941-2009
Vazão média	16,69	
Vazão máxima	225,80	

Fonte: Adaptado pelos autores (2017).

Localização da usina

O empreendimento fica na cidade de Rio dos Cedros. A usina será do tipo fio d'água, sem represamento. Conforme a figura a seguir, a tomada de água será realizada no ponto A. O canal de adução é indicado pela linha amarela e a casa de máquinas será instalada no ponto B.

Figura 13. Imagem de satélite da obra



Fonte: Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 23 jul. 2018.

A tomada de água, ponto A, está a 97 metros acima do nível do mar, e as turbinas da casa de máquinas, ponto B, estão a 83 metros. Logo, a queda d'água será de 14 metros. O canal de adução terá aproximadamente 620 metros de comprimento e atravessará a montanha, interligando a tomada de água à casa de máquinas.

Nas figuras a seguir, podemos visualizar, respectivamente, o local da tomada de água e o local de instalação da casa de máquinas.

Figura 14. Vista do local da tomada de água



Fonte: Os autores (2017).

Como é possível verificar, em ambos os locais há espaço disponível para construção e instalação dos equipamentos necessários.

Figura 15. Vista do local de instalação da casa de máquinas



Fonte: Os autores (2017).

Cálculo da potência instalada

Com base nos dados levantados da vazão do rio e da queda d'água, podemos calcular a potência máxima, que será calculada utilizando as equações (I) e (II). Devemos iniciar pelo cálculo da energia firme estimada (ELETROBRÁS, 2000):

$$EF_e = \frac{\mu \cdot g \cdot Q \cdot H_{liq}}{1000} \quad (I)$$

Na forma simplificada:

$$EF_e = 0,0083 * Q * H_{liq} \text{ (MW médio)} \quad (II)$$

Sendo:

EF_e = Energia firme estimada em MW médios, considerando as variáveis Q e H_{liq} constantes durante o funcionamento da usina.

μ = Rendimento do conjunto turbina-gerador, cujo valor aplicado é de 0,85.

g = Gravidade, considerando-se 9,81 m/s².

Q = Vazão média ao longo do período observado (m³/s).

H_{liq} = Queda líquida (m).

Realizando os cálculos através da utilização da Equação (I), o valor obtido para a energia firme estimada, em MW médios, é:

$$EF_e = \frac{0,85 \cdot 9,81 \cdot 16,69 \cdot 14}{1000}$$

$$EF_g = 1,9484 \text{ MW}$$

Para a potência instalada, será utilizada a equação (III):

$$Pot = \frac{EF_g}{F_c} \quad (III)$$

Sendo:

Pot = Potência instalada em MW.

F_c = Fator de capacidade, cujo valor que será adotado é de 0,65.

Substituindo os valores, obtemos:

$$Pot = \frac{1,9484}{0,65}$$

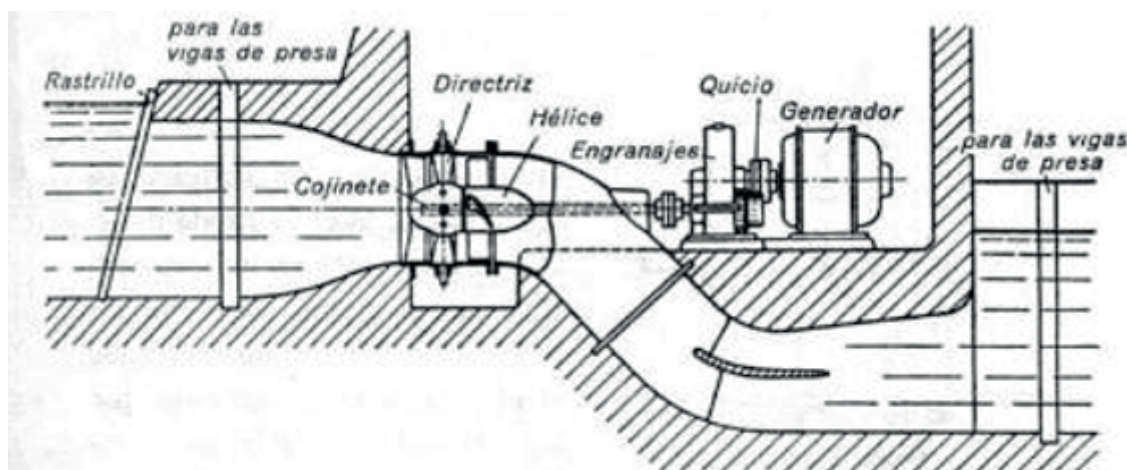
$$Pot = 2,9975 \text{ MW}$$

Seleção da turbina hidráulica e gerador

Em um primeiro momento, a escolha da turbina hidráulica do projeto será especificada de acordo com o campo de aplicação que, neste caso, será a turbina tubular “S”, indicada para quedas entre 4 e 25 metros, potências entre 500 kW e 5.000 kW e vazões até 22,5 m³/s.

A turbina tubular “S” é uma variação da turbina do tipo Kaplan. Contudo, diferentemente da turbina tipo Kaplan, a turbina tubular “S” é instalada horizontalmente com o conduto forçado (ELETROBRÁS, 2000).

Figura 16. Turbina tubular “S”



Fonte: Albuquerque (2006).

A turbina tubular “S” possui pás e distribuidor regulável. Assim, a faixa de operação da turbina será de 100% a 20% da carga nominal. O custo de aquisição da turbina será maior quando comparado ao custo de uma turbina tubular “S” sem as pás e distribuidor.

A escolha leva em consideração que a usina trabalhará com a própria vazão do rio e, assim, será uma forma de obter uma eficiência maior mesmo com as oscilações da vazão do rio (ELETROBRÁS, 2000).

Será adotada, também, a instalação de três turbinas hidráulicas com potência de 1.000 kW cada para um maior aproveitamento da vazão do rio nos períodos de cheia. A usina irá operar com duas turbinas em regime permanente e uma em estado reserva. Assim, o equipamento que estiver parado estará apto a receber as devidas manutenções, sem interferir nos valores de geração estimados.

A velocidade de rotação da turbina será determinada pela Equação (IV), sendo utilizado um coeficiente K de 2200 (ELETROBRÁS, 2000):

$$n = \frac{K \cdot H_{liq}^{0,75}}{P^{0,5}} \quad (IV)$$

Sendo:

H_{liq} = Queda líquida (m).

K = Coeficiente adimensional.

P = Potência da turbina (kW).

Com os dados numéricos de cada grandeza, foi encontrado o valor da velocidade de rotação da turbina para o projeto em questão:

$$n = \frac{2200 \cdot 14^{0,75}}{1000^{0,5}},$$

$$n = 503,52 \text{ rpm.}$$

Após determinada a velocidade de rotação, o próximo passo será determinar a velocidade específica da turbina de acordo com a equação (V). Levando em consideração que serão utilizadas duas turbinas em regime permanente e uma turbina reserva, logo a vazão disponível do rio será dividida entre as duas turbinas que estarão em operação:

$$N_{qr} = \frac{n \cdot Q_r^{0,8}}{H_r^{0,75}} \quad (V)$$

Sendo:

N_{qr} = Velocidade específica da turbina (rpm).

n = Velocidade de rotação da turbina (rpm).

Q_r = Vazão nominal (m^3/s).

H_r = Altura de queda nominal (m).

Obtemos, então, a velocidade específica da turbina:

$$N_{qr} = \frac{503,52 \cdot 8,345^{0,5}}{14^{0,75}}$$

$$N_{qr} = 200,97 \text{ rpm}$$

Para determinação do gerador síncrono, será calculado o número de polos através da Equação (VI):

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad \text{ou, ainda,} \quad p = \frac{120 \cdot f}{n} \quad (\text{VI})$$

Sendo:

n = Velocidade de rotação síncrona.

f = Frequência.

p = Número de polos do gerador.

Assim, estimou-se o número de polos do gerador:

$$p = \frac{120 \cdot 60}{200,97}$$

$$p = 35,83 \approx 36 \text{ polos}$$

Para o cálculo da potência na saída do gerador, será utilizada a Equação (VII) a seguir:

$$P_g = 9,81 \cdot Q \cdot H_{liq} \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (\text{VII})$$

Sendo:

P_g = Potência na saída do gerador (kW).

Q = Vazão da turbina (m^3/s).

H_{liq} = Queda líquida (m).

η_T = Rendimento da turbina.

η_G = Rendimento do gerador.

$\eta_T \cdot \eta_G = 0,85$;

Para o rendimento turbina-gerador, será adotado o valor de 0,85:

$$P_g = 9,81 \cdot 8,345 \cdot 14 \cdot 0,85$$

$$P_g = 974,19 \text{ kW}$$

Parâmetros gerais da CGH

Conforme dados levantados, cálculos realizados e definições tomadas, foi possível determinar os parâmetros da usina de geração de energia, classificados como uma central de geração hidrelétrica que possui potência instalada de até 5 MW. A tabela a seguir demonstra, de

forma simplificada, os dados alcançados.

Tabela 4. Parâmetros gerais da CGH

Potência instalada	2,9975 MW
Energia média gerada	1,9484 MW
Vazão média	16,69 m ³ /s
Queda	14 m
Área de reservatório	Não há
Área inundada	Não há
Turbinas	3 unidades, Kaplan Tubular S, com potência unitária de 1,0 MW, 200 rpm
Localização	Rio dos Cedros – Município de Rio dos Cedros – SC

Fonte: Os autores (2017).

Análise financeira

A análise financeira de um empreendimento tem por objetivo determinar se o projeto é viável. Utilizando indicadores de viabilidade, é possível criar um modelo simulando os resultados esperados.

Para essa análise, serão adotados métodos para avaliação de investimentos em ativos fixos, tais como: fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* (CANDIDO; SANTOS, 2012).

A determinação do fluxo de caixa estabelece todos os valores envolvidos no projeto, como o capital utilizado na implantação da usina, o capital necessário para as despesas de manutenção e operação e todos os impostos inerentes à modalidade de empreendimento.

O VPL é uma ferramenta que pode ser utilizada para determinar a viabilidade de um negócio. Devem ser levados em consideração o investimento inicial e o valor do dinheiro no tempo e, ainda, considerando uma taxa mínima de atratividade.

A taxa interna de retorno pretende buscar uma taxa de rendimento mínima desejada. De acordo com o resultado obtido, é possível avaliar o percentual de ganho ao compará-lo com outras formas de investimentos disponíveis no mercado financeiro. Se essa taxa for superior aos valores encontrados, significa que o investimento é viável (CANDIDO; SANTOS, 2012).

O *payback* simples é uma forma de análise que leva em consideração quanto tempo o investidor terá que esperar para recuperar o capital investido. Com o valor obtido, o investidor irá avaliar se o tempo de retorno é inferior ao tempo máximo aceitável. Uma desvantagem desse método de análise é que o *payback* simples não leva em consideração o valor do dinheiro no tempo (CANDIDO; SANTOS, 2012).

O projeto terá como base a utilização de um custo médio de implantação de R\$ 9.700,00/kW, conforme dados levantados em uma pesquisa com uma empresa que atua no mercado na construção de usinas de geração hidrelétrica e que tem foco em pequenas centrais hidrelétricas e centrais geradoras hidrelétricas.

Fluxo de caixa

O fluxo financeiro da CGH teve como base a utilização de um custo médio de implantação de R\$ 9.700,00/kW. Assim, as deduções de despesas e receitas foram projetadas para poderem dar ao investidor os subsídios mínimos para a avaliação do investimento.

As receitas foram planejadas de acordo com os resultados alcançados. Para geração de energia assegurada, foi utilizado um coeficiente de 0,8. A usina não trabalhará em sua geração máxima a todo momento e o tempo de operação é de 23 horas por dia, pois 1 hora é o tempo para realizar as manutenções preventivas no sistema. Ainda, o valor médio de venda da energia considerado é de R\$ 235,00/MW.

Tabela 5. Planejamento das receitas

DADOS BASE	
Energia instalada (MW)	1,9484
Energia assegurada (MW médio)	1,55872
Produção horas/dia	23
Dias/mês	30
Preço atual (R\$/MW)	235,00
Perdas na linha de transmissão	3,80%
Receita bruta mês	R\$ 243.142,08
Receita bruta ano	R\$ 2.917.705,00
Custo médio R\$/kW	R\$ 9.700,00
Custo de implantação	R\$ 18.899.480,00

Fonte: Adaptado pelos autores (2017).

A geração de energia elétrica é um ramo de atividade da indústria que pode optar pela tributação do lucro presumido, desde que não possua uma receita bruta anual superior a 48 milhões de reais. Dessa forma, a próxima tabela demonstra as alíquotas e a memória de cálculo para dedução dos impostos (BEVILACQUA NETO, 2013).

Tabela 6. Lucro presumido

Descrição	Alíquota	Cálculo
PIS	0,65%	0,65% * receita bruta
COFINS	3,00%	3,00% * receita bruta
CSLL	9,00% sobre a base de cálculo de 12,00% da receita bruta	9,00% * 12,00% * receita bruta
IRPJ	25,00% sobre a base de cálculo de 8,00% da receita e, quando o resultado exceder 240 mil, estará sujeito a um adicional de 10%	(25,00% * 8,00% * receita bruta) + ((receita bruta - 240.000,00) * 10,00%)

Fonte: Bevilacqua Neto (2013).

Para o fluxo de caixa da CGH, foram determinadas as despesas de operação.

Tabela 7. Despesas operacionais

Despesas operacionais	% sobre receita bruta
Operações e manutenção (O&M)	7,50%
Sobressalentes e ferramentas	2,10%
Seguros	1,50%
Administração	3,00%
TUSD	3,50%
Taxa Aneel	0,50%

Fonte: Candido e Santos (2012).

Com base nas informações descritas, a projeção do fluxo de caixa da CGH foi elaborada e é apresentada de forma completa no Apêndice A.

VPL, TIR e Payback

A apresentação do valor presente líquido, da taxa interna de retorno e do *payback* simples foi feita em três cenários para termos uma visão mais ampla e para podermos tomar conhecimento de que oscilações no mercado podem ocorrer.

Tabela 8. Análise de cenários

CENÁRIOS			
	PESSIMISTA	BASE	OTIMISTA
Investimento inicial	R\$ 22.679.376,00	R\$ 18.899.480,00	R\$ 17.009.532,00
Preço de venda	R\$ 188,00	R\$ 235,00	R\$ 258,50
TMA*	15,70%	15,70%	15,70%
VPL	R\$ 593.994,00	R\$ 8.909.943,00	R\$ 13.067.913,00
TIR	16,08%	22,02%	25,71%
Payback simples	10 ANOS	8 ANOS	7 ANOS

*Taxa mínima de atratividade

Fonte: Os autores (2017).

Com os estudos realizados e com uma taxa mínima de atratividade de 15,70%, a CGH foi apresentada como uma opção favorável de investimento mesmo em cenários adversos, pessimistas. Fora desse cenário, a CGH possui oportunidades de ganhos superiores quando comparadas à taxa mínima de atratividade.

Conclusão

O país precisa buscar soluções para o crescimento da demanda de energia elétrica. Favoravelmente, possui um grande potencial energético, ainda pouco explorado. Projetos de grandes centrais de geração de energia demandam muitos fatores e demoram muitos anos para saírem do papel, entretanto.

Algumas soluções, como as pequenas e minicentrais de geração de energia, aumentam a capacidade de geração de energia e, por serem empreendimentos menores, são mais fáceis e rápidos de construir, envolvendo menos estudos ambientais e maior velocidade nas aprovações devido ao baixo impacto ambiental proporcionado.

Outro ponto forte das pequenas e minicentrais de geração de energia é que estas costumam se instalar nas proximidades dos centros de carga, trazendo vantagens ao sistema interligado nacional e economizando investimentos em linhas de transmissão e subestações.

A região de Santa Catarina possui várias bacias hidrográficas que, muitas vezes, não atendem aos requisitos de instalação de grandes centrais de geração, como as UHEs. Entretanto, ainda assim, é um ambiente muito favorável para a instalação de usinas de menor porte, como as CGHs.

A bacia não apresenta grandes vazões, entretanto é um lugar propício para a instalação de usinas de menor porte. O estudo de viabilidade apresentado neste trabalho demonstrou um local com potencial para geração de energia hidrelétrica, cabível de estudos mais detalhados para elaboração dos projetos básicos e para a busca de investidores para a execução do empreendimento.

Referências

ALBUQUERQUE, Rodrigo Barbosa da Fonseca e. **Projeto de turbinas hidráulicas axiais com parametrização da geometria, equação de equilíbrio radial e técnicas de otimiza-**

ção. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

BEVILACQUA NETO, Saulo Salles. **Viabilidade econômica e financeira de uma pequena central hidrelétrica e sua inserção na matriz energética brasileira**. 2013. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BORGES NETO, Manuel Rangel; CARVALHO, Paulo. **Geração de energia elétrica: fundamentos**. São Paulo: Érica, 2012.

CANDIDO, Bruno Santos Lopes; SANTOS, Fernando de Almeida. Estudo de viabilidade econômico-financeira de uma central geradora hidrelétrica (CGH). **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 2, n. 3, p.3-27, 10 set. 2012.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2000.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2017, ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

FURNAS. **Parque gerador: usina hidrelétrica**. 2017. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp>. Acesso em: 23 set. 2017.

HARVEY, A.; BROWN, A.; HETTIARACHI, P.; INVERSIN, A. **Design manual – a guide to small scale power schemes**. London: IT Publications, 1998.

PORTAL LIGHT. **Microgeração e minigerção**. 2018. Disponível em: <<http://www.light.com.br/para-empresas/Nossos-Servicos/extrato-energia-alternativa.aspx>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

SEMINÁRIO DE USINAS REVERSÍVEIS. **A retomada do conceito de usinas hidrelétricas reversíveis no setor elétrico brasileiro**. São Paulo: Eletrobras, 2014.

SIMONE, Gilio Aluisio. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos: uma introdução ao estudo**. São Paulo: Érica, 2010.

SOARES, Pétrick Anderson et al. Estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas com escassez de dados fluviométricos. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v. 12, n. 1, p. 29-38, jun. 2010.

Apêndice A

Fluxo de caixa

FLUXO DE CAIXA ANUAL	% sobre receita	CONSTRUÇÃO ANO1	ANO 1
ENTRADAS			
Receita operacional bruta			2.917.705
Aporte de capital próprio		- 18.899.480	-
Total de entradas		18.899.480	2.917.705
SAÍDAS			
Total de investimentos		- 18.899.480	-
Total de despesas			634.601
Despesas operacionais			528.105
(-) Operações e manutenção (O&M)	7,50%		218.828
(-) Sobressalentes e ferramentas	2,10%		61.272
(-) Seguros	1,50%		43.766
(-) Administração	3,00%		87.531
(-) TUSD	3,50%		102.120
(-) Taxa Aneel	0,50%		14.589
Total de tributos sobre a receita			106.496
(-) PIS	0,65%		18.965
(-) COFINS	3,00%		87.531
Total tributos sobre resultado			357.636
(-) Contribuição social	1,08%		31.511
(-) IRPJ	25% - 8% - 10%		326.125
Total de saídas		- 18.899.480	992.237
Entradas - saídas		- 18.899.480	1.925.468
Fluxo de caixa - Acumulado		- 18.899.480	- 16.974.012

Fonte: O autor (2017).

ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7
3.127.488	3.352.354	3.593.389	3.851.753	4.128.694	4.425.547
-	-	-	-	-	-
3.127.488	3.352.354	3.593.389	3.851.753	4.128.694	4.425.547
-	-	-	-	-	-
680.229	729.137	781.562	837.756	897.991	962.557
566.075	606.776	650.403	697.167	747.294	801.024
234.562	251.427	269.504	288.881	309.652	331.916
65.677	70.399	75.461	80.887	86.703	92.936
46.912	50.285	53.901	57.776	61.930	66.383
93.825	100.571	107.802	115.553	123.861	132.766
109.462	117.332	125.769	134.811	144.504	154.894
15.637	16.762	17.967	19.259	20.643	22.128
114.153	122.361	131.159	140.589	150.697	161.532
20.329	21.790	23.357	25.036	26.837	28.766
93.825	100.571	107.802	115.553	123.861	132.766
385.075	414.488	446.015	479.809	516.033	554.862
33.777	36.205	38.809	41.599	44.590	47.796
351.299	378.283	407.207	438.210	471.443	507.066
1.065.304	1.143.625	1.227.577	1.317.566	1.414.024	1.517.418
2.062.184	2.208.729	2.365.811	2.534.188	2.714.670	2.908.129
-	-	-	-	-	-
14.911.828	12.703.098	10.337.287	7.803.099	5.088.429	2.180.300

Fonte: O autor (2017).

ANO 8	ANO 9	ANO 10	ANO 11	ANO 12	ANO 13
4.743.744	5.084.820	5.450.418	5.842.303	6.262.365	6.712.629
-	-	-	-	-	-
4.743.744	5.084.820	5.450.418	5.842.303	6.262.365	6.712.629
-	-	-	-	-	-
1.031.764	1.105.948	1.185.466	1.270.701	1.362.064	1.459.997
858.618	920.352	986.526	1.057.457	1.133.488	1.214.986
355.781	381.361	408.781	438.173	469.677	503.447
99.619	106.781	114.459	122.688	131.510	140.965
71.156	76.272	81.756	87.635	93.935	100.689
142.312	152.545	163.513	175.269	187.871	201.379
166.031	177.969	190.765	204.481	219.183	234.942
23.719	25.424	27.252	29.212	31.312	33.563
173.147	185.596	198.940	213.244	228.576	245.011
30.834	33.051	35.428	37.975	40.705	43.632
142.312	152.545	163.513	175.269	187.871	201.379
596.482	641.094	688.915	740.173	795.117	854.012
51.232	54.916	58.865	63.097	67.634	72.496
545.249	586.178	630.050	677.076	727.484	781.515
1.628.246	1.747.043	1.874.381	2.010.874	2.157.182	2.314.009
3.115.498	3.337.777	3.576.037	3.831.429	4.105.183	4.398.620
935.198	4.272.975	7.849.013	11.680.442	15.785.625	20.184.245

Fonte: O autor (2017).

ANO 14	ANO 15	ANO 16	ANO 17	ANO 18	ANO 19
7.195.267	7.712.606	8.267.143	8.861.550	9.498.696	10.181.652
-	-	-	-	-	-
7.195.267	7.712.606	8.267.143	8.861.550	9.498.696	10.181.652
-	-	-	-	-	-
1.564.971	1.677.492	1.798.104	1.927.387	2.065.966	2.214.509
1.302.343	1.395.982	1.496.353	1.603.941	1.719.264	1.842.879
539.645	578.445	620.036	664.616	712.402	763.624
151.101	161.965	173.610	186.093	199.473	213.815
107.929	115.689	124.007	132.923	142.480	152.725
215.858	231.378	248.014	265.847	284.961	305.450
251.834	269.941	289.350	310.154	332.454	356.358
35.976	38.563	41.336	44.308	47.493	50.908
262.627	281.510	301.751	323.447	346.702	371.630
46.769	50.132	53.736	57.600	61.742	66.181
215.858	231.378	248.014	265.847	284.961	305.450
917.141	984.809	1.057.342	1.135.091	1.218.429	1.307.760
77.709	83.296	89.285	95.705	102.586	109.962
839.432	901.513	968.057	1.039.386	1.115.844	1.197.798
2.482.111	2.662.301	2.855.446	3.062.478	3.284.396	3.522.269
4.713.155	5.050.306	5.411.697	5.799.072	6.214.300	6.659.383
24.897.400	29.947.706	35.359.403	41.158.475	47.372.775	54.032.158

Fonte: O autor (2017).

ANO 20	ANO 21	ANO 22	ANO 23	ANO 24	ANO 25
10.913.713	11.698.409	12.539.525	13.441.116	14.407.533	15.443.434
-	-	-	-	-	-
10.913.713	11.698.409	12.539.525	13.441.116	14.407.533	15.443.434
-	-	-	-	-	-
2.373.733	2.544.404	2.727.347	2.923.443	3.133.638	3.358.947
1.975.382	2.117.412	2.269.654	2.432.842	2.607.763	2.795.262
818.528	877.381	940.464	1.008.084	1.080.565	1.158.258
229.188	245.667	263.330	282.263	302.558	324.312
163.706	175.476	188.093	201.617	216.113	231.652
327.411	350.952	376.186	403.233	432.226	463.303
381.980	409.444	438.883	470.439	504.264	540.520
54.569	58.492	62.698	67.206	72.038	77.217
398.351	426.992	457.693	490.601	525.875	563.685
70.939	76.040	81.507	87.367	93.649	100.382
327.411	350.952	376.186	403.233	432.226	463.303
1.403.514	1.506.152	1.616.170	1.734.098	1.860.505	1.996.001
117.868	126.343	135.427	145.164	155.601	166.789
1.285.646	1.379.809	1.480.743	1.588.934	1.704.904	1.829.212
3.777.246	4.050.556	4.343.516	4.657.541	4.994.144	5.354.948
7.136.467	7.647.853	8.196.008	8.783.576	9.413.389	10.088.486
61.168.625	68.816.478	77.012.486	85.796.062	95.209.451	105.297.937

Fonte: O autor (2017).

Artigo recebido em: 20/05/2018. Publicado em: 03/09/2018.