



Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro com foco na mitigação das emissões de CO₂.

Luiz Filipe Alves Cordeiro¹, Vilma Alves de Souza²

¹Universidade Federal de Pernambuco e Tribunal de Justiça de Pernambuco
(luiz.filipe@tjpe.jus.br)

² Tribunal de Justiça de Pernambuco (vilma.aves@tjpe.jus.br)

Resumo

A energia está atualmente em foco no mundo todo. Este trabalho descreve a aplicação de modelagem, controle e inteligência artificial para melhorar a eficiência energética em sistemas de bombeamento. Esta abordagem de inteligência artificial pode ser aplicada a sistemas industriais, a fim de reduzir o consumo de energia. Entre as contribuições desse trabalho esta investigar o problema das emissões de dióxido de gases de efeito estufa (particularmente dióxido de carbono) derivado da geração termelétrica no Brasil. Para isso, foi projetado um modelo que quantifica as emissões dióxido de carbono (CO₂) e procura otimizar o sistema. Para isso, foi utilizado o plano de decenal de expansão e comparado os cenários estudados através da otimização por emissão e custo total da geração.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Emissões de CO₂. Redes Neurais Artificiais.

Área Temática: Energia e energias renováveis

The Brazilian Power Sector planning with focus on CO₂ Emissions

Abstract

The energy issue is presently in focus worldwide. This work describes the application of modeling, control, and artificial intelligence to improve energy efficiency in pump systems. This Artificial Intelligence approach can be applied to industrial systems in order to reduce the energy consumption. Among the contributions of this work is investigate the problem of emissions of greenhouse gases (particularly carbon dioxide) derived from thermoelectric generation in Brazil. For this, was projected the simplex optimization model as a way to determine the carbon dioxide (CO₂) emissions that is found from the optimization of the order of plants. For this, we used data from the decennial program of power sector expansion and compared the scenarios under study regarding the optimization of emissions and total cost of power generation.

Key words: Energy Efficiency. CO₂ Emissions. Artificial Neural Network.,

Theme Area: Energy



1 Introdução

A mudança climática é um fenômeno natural e apresenta períodos de mudanças intensas durante a história da Terra. Porém, a rapidez da alteração climática das últimas décadas é considerada pelos cientistas um fenômeno atípico. No Acordo de Copenhague(2009), uma declaração de suma relevância foi realizada: "A mudança climática é um dos maiores desafios do nosso tempo [1]. Diversos estudos confirmam que a elevação da temperatura média da Terra e o aumento do nível dos mares pelo derretimento das áreas geladas são evidências da intensificação de gases do efeito estufa.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)[2], as emissões de gases do efeito estufa provenientes das atividades da sociedade duplicaram nas últimas quatro décadas. Do total dessas emissões, quase 80% corresponde ao dióxido de carbono, que nessa época teve um aumento de 21 para 38 gigatoneladas (Gt). O aumento de emissões de dióxido de carbono equivalente foi bem maior nas últimas duas décadas, do que nas duas primeiras. Vale salientar que os setores que mais contribuíram para o aumento de emissões foram energia, transporte e a indústria. Atualmente, estudos sugerem que o planeta está próximo aos 50 Gt CO₂ e poderá chegar a 61 Gt em 2020 e 70 Gt em 2030. Sendo assim, em março de 2009, na Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas em Copenhague [1], os governos decidiram coletivamente que o mundo precisa para limitar a aumento da temperatura média global a não mais que 2 graus Celsius e as negociações internacionais estão empenhadas para esse fim [3].

Como a energia e a indústria são os setores que mais contribuem para o aumento das emissões, tornam-se os principais condutores da política energética nas próximas décadas [4].

Nesse aspecto, percebe-se que a nível mundial, a União Europeia é líder na tomada de medidas para mitigar a mudança climática [5], pois, foi estabelecido o chamado pacto 20-20-20 em metas de redução:

- (1) reduzir as emissões de CO₂ em pelo menos 20%;
- (2) aumentar a proporção de energias renováveis em sua energia misturar a 20% ;
- (3) reduzir o seu consumo de energia em 20% até 2020.

A nível nacional percebe-se que o Brasil, quando da celebração do Protocolo de Kyoto, não foi obrigado a adotar metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, porém, isso não o exime de participar do esforço mundial de mitigação. Sendo assim, constata-se que alguns estudos específicos de grande importância para este setor no Brasil foram os realizados por MCKINSEY [6] e LA ROVERE [7]. Ambos indicam potenciais de redução de emissões para o médio/longo prazo para alguns sub-setores e estimam custos de abatimento. Embora estes trabalhos sejam muito ricos, e sirvam de ponto de partida para a discussão e a análise das medidas de mitigação no setor, possivelmente não puderam se aprofundar em certos detalhes pela grande variedade e complexidade de setores.

Do exposto acima, percebe-se uma lacuna significativa nas avaliações do potencial de mitigação existente no Brasil, mais especificamente, no setor elétrico. Uma investigação mais detalhada poderia incluir desde medidas mais simples de conservação de energia e eficiência energética no consumo de energia elétrica, bem como às possibilidades mais complexas visando a redução das emissões de GEE a médio e longo prazo. Outra lacuna relevante é a análise do planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro, visando não só a segurança no quesito confiabilidade, mas também a minimização das emissões de CO₂ pela utilização de uma matriz energética mais limpa.



2 Metodologia

A operação diária de um sistema elétrico de potência envolve o despacho de usinas hidroelétricas, térmicas e eólicas. Devido à grande dimensão dos sistemas elétricos, o despacho das usinas é uma tarefa extremamente complexa, podendo ser realizada de modo eficiente, buscando o menor custo e o maior nível de segurança, com um auxílio de um programa de Despacho Hidrotérmico-Eólico Ótimo (DHO). O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto dos sistemas de geração e de transmissão de energia elétrica.

O sistema de geração tem a característica descentralizada devido à grande dimensionalidade do país. Desta forma, as fontes geradoras de grande porte são distribuídas ao longo de todo território nacional.

O planejamento da operação de um sistema elétrico tem como objetivo definir uma estratégia de geração para cada usina que minimiza o valor esperado dos custos operativos no período de planejamento [8]. Os custos operativos referem-se aos gastos com combustíveis nas usinas termoeletricas, custos de não atendimento à carga e eventuais compras de energia de sistemas vizinhos (intercâmbio). A interligação entre sistemas vizinhos permite uma redução dos custos de operação, por meio do intercâmbio de energia e um aumento da confiabilidade de fornecimento, por meio da repartição de reservas [9]. Caso um sistema possua um custo de operação mais elevado que um vizinho, o mais econômico seria transferir a energia do sistema de custo de operação mais barato para o sistema de custo de operação mais elevado. Os intercâmbios de energia entre sistemas contendo usinas térmicas resultam na otimização global dos custos de operação do sistema interligado.

Este trabalho apresenta um programa computacional de DHO, desenvolvido a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Modelo de Otimização da Simulação Energética de Energia Eólica e Outras Fontes no NE” fruto da parceria entre CHESF e UFPE. Os problemas de DHO são formulados nesse trabalho como problemas de programação linear (PL). Devido ao histórico de êxito dos métodos de pontos interiores (PI) na solução de problemas de PL de grande porte [10,11], os problemas de DHO são resolvidos pelos algoritmos Primal-Dual Simplex e Primal-Dual Predictor Corretor de PI. Dessa forma, contribui com o desenvolvimento de um programa computacional de DHO voltado a função de otimização “CO2”, bem como na formulação de problemas de DHO e na solução dos mesmos por meio dos algoritmos de PI.

Otimização por CO2

Definiu-se uma metodologia para mensurar as emissões de CO₂ por tipo de combustível, utilizando os critérios adotados no relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). A função objetivo adotada, neste caso, é de minimização do valor presente das emissões de CO₂ provenientes da geração térmica e de déficit. As emissões de gás carbônico foram quantificadas de modo a estimar valores de emissões para as usinas termelétricas. Semelhantemente a otimização por custos de geração térmica e de déficit utilizou-se o dhoVisual.

Função Objetivo

$$\min EMISS\tilde{O}ES = \min \sum_{t=1}^T \lambda t \cdot [\sum_{j=1}^J ETj(GTj, t) + \sum_{s=1}^S EDs(DEFs, t)] \quad (1)$$

$$\lambda t = \frac{1}{(1 + \beta)^t}$$

Onde:



λt : coeficiente de valor presente para o período t ;

GT_j, t : geração da usina térmica i durante o período t [MWmês];

ET_j : emissões da usina térmica j para o período t [CO₂];

ED_s : emissões do déficit do sistema s [CO₂].

A função E^{Tj} é uma função que representa as Emissões da usina térmica, que depende do tipo de combustível utilizado pela usina e será aproximado por um polinômio do segundo grau.

O valor “ambiental” dos déficits de energia representado pela variável ED_s , a função de custo de emissões de déficit do subsistema s [CO₂], deve representar o impacto causado pelo não suprimento da demanda de energia nas diferentes atividades econômicas do país, este custo está representado por um polinômio de segundo grau, obtido por aproximação quadrática da função linear por partes definida pelo NEWAVE[12].

Semelhante a otimização da função custo, a restrição de balanço hídrico e de atendimento a demanda são realizadas da mesma forma.

Com essa ferramenta acima, o Operador Nacional de Sistema (ONS) será capaz de operar o sistema com o intuito a minimizar as emissões de CO₂ ao invés da operação atual que visa o menor custo e a segurança.

Vale a pena ressaltar que na sessão de resultados pode-se são realizadas simulações com os dois tipos de otimizações para efeitos de comparação.

Por fim, vale informar que serão feitas simulações com redução de consumo de energia em 5% para verificar como o sistema se comportaria caso fosse implantada políticas de eficiência energética no consumo como as propostas nesse trabalho.

A melhoria da eficiência energética é considerada como a forma mais rápida e mais barata de reduzir as emissões de CO₂, ela é vista como uma das medidas mais promissoras para a redução global das emissões de CO₂ [13]. E ainda, baseado nos casos de sucesso como na União européia, cujo potencial de economia de energia elétrica nos setores terciário e industrial são da ordem de 8 TWh/ano até 2015, com aplicação de inversores em cargas como: ventiladores, bombas, compressores e esteiras transportadoras[14 e 15].

Com isso, no intuito de promover ações que busquem a minimização das emissões de CO₂, através do uso da eficiência energética foram desenvolvidos experimento no Laboratório de Eficiência em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ, a proposta de um método de economia de energia e eficiência energética no setor que mais consome energia no país: indústria. E, dentro desse setor, o sistema que mais consome energia: o de bombeamento. Dessa forma, contribui diretamente com as metas de redução de emissões de CO₂.

Salienta-se ainda que já foram obtidos resultados relevantes [16, 17 e 18]. Eles mostram que o setor industrial no Brasil ainda apresenta grande potencial de redução de consumo de energia elétrica e consequentemente de emissões para o médio/longo prazo.

Nesta proposta, faz necessário apresentar os resultados já obtidos no Lamotriz da UFPE em Sistemas de Bombeamento.

Inicialmente, a metodologia consiste na substituição do controle de vazão do sistema por válvula estrangulada pela utilização do inversor de frequência.

Na sessão de resultados, percebe-se que a simples troca da válvula estrangulada pelo inversor de frequência pode trazer ganhos de economia de energia considerados.

Por fim, salienta-se que como o nosso foco é a redução de GEE, não se tecerá outros detalhes como redução de corrente de partida, menores danos de pressões na tubulação, economia financeira, menor manutenção do sistema, etc.

Em busca de ganhos ainda maiores, no Lamotriz, foram aplicadas técnicas de Inteligência Artificial visando auxiliar o controle de fluxo com o inversor de frequência.



Considerando que o setor industrial é responsável por quase metade das emissões de CO₂ do sistema elétrico brasileiro, conclui-se que investindo nesse setor, conforme tecnologia abordada pode-se obter considerável redução quando utilizado em sistemas industriais que já apresentam algum avanço como a utilização do inversor de frequência.

Dessa forma, a proposta de mitigação das emissões de CO₂ consiste em implantar junto às indústrias as medidas propostas acima.

3 RESULTADOS

Utilizando o dhoVisual, escolheu-se o cenário com o mercado iniciando em 2013, simulando-se 5 anos, com a base de dados operativos do PDE 2022, e escolhendo algumas hidrologias, tais como, 1949~1953 no caso de 5 anos para título de análise dos cenários energéticos, os resultados obtidos são demonstrados, que demonstra o comportamento do Custo Marginal de Operação (CMO), que é a variação do custo operativo necessário para atender 1 MWh adicional de demanda, utilizando os recursos existentes.

Na Figura 1 é apresentada uma comparação entre o Custo Marginal de Operação entre o mercado normal e o mercado conservado 5%. Nesse caso, a otimização esta sendo realizada por custo.

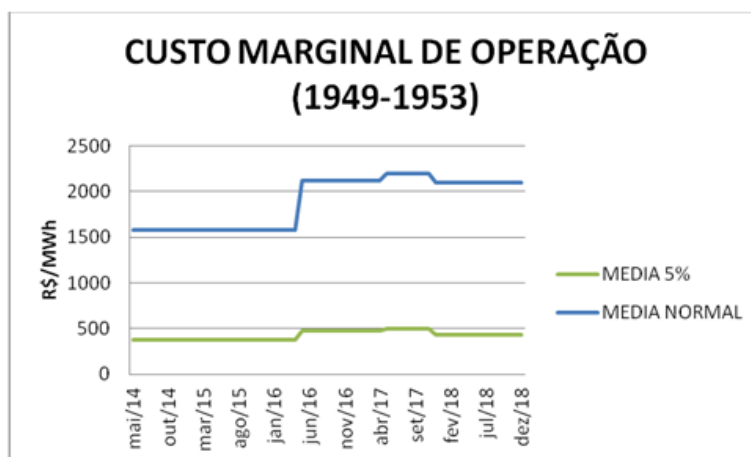


Figura 1 – Custo Marginal da Média referente ao período hidrológico de 1949-1953

Analisando a Figura 1, mais especificamente a linha azul, nota-se que a hidrologia de 1949~1953, apresenta um CMO elevado, situação de elevados CMOs é reflexo dos baixos níveis de armazenamento verificados no SIN, e a partir de maio de 2016 esse CMO, eleva-se consideravelmente para valores de até 2.200,00 R\$/MWh. Vale salientar que, conforme já informado, esses são valores médios, porém em alguns anos o CMO atingiu o patamar de 3.100,00 R\$/MWh, mantendo-se assim até o fim do período de estudo, esse valor representa o custo de déficit, ou seja, o sistema hidrotérmico, para esse condição hidrológica, não consegue atender a demanda existente de energia elétrica. Por outro lado, quando é analisada a linha verde desta Figura 1, constatam-se valores bem inferiores chegando a quase cinco vezes menores nos períodos críticos. E ainda, vale informar que não haveria déficits no período se o mercado estivesse 5% reduzido através de formas eficiente e conservação de energia.

Analogamente ao modelo de otimização pelos custos de operação das térmicas e déficits já tratado anteriormente, onde se verifica o Custo Marginal de Operação (CMO); será adotado para efeito deste trabalho, no caso da otimização utilizando como custo as emissões de CO₂ das respectivas térmicas, o que intitulemos de Emissão Marginal de Operação (EMO).

Vale salientar que a EMO será de suma importância nesse trabalho para avaliar os resultados das simulações dos diversos casos analisados, buscando sempre um planejamento



do sistema elétrico com maior segurança ambiental, isto é, minimizando-se o máximo as emissões de dióxido de carbono.

A partir da Figura 2 constata-se a comparação para o caso das emissões de CO₂, ressalta-se que nesse caso, utilizou-se a otimização do DHO por CO₂, conforme metodologia descrita no capítulo anterior.

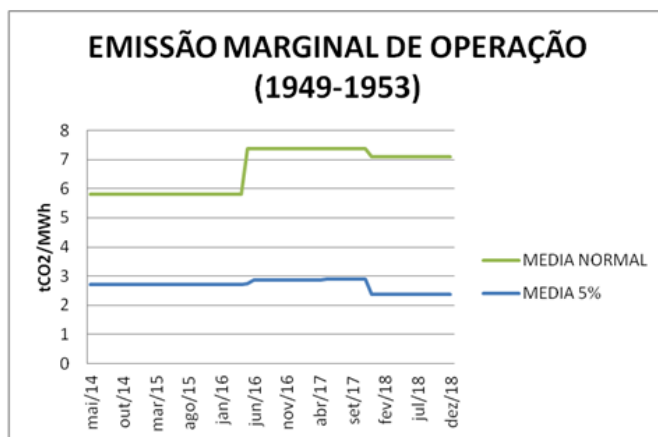


Figura 2 – Emissão Marginal da Média referente ao período hidrológico de 1949-1953

Através da análise da Figura 3.2, nota-se que para esta hidrologia de seca, as emissões de CO₂, elevam-se consideravelmente a partir de maio de 2016, atingindo valores bem elevados da ordem de 7,4 tCO₂/MWh. Por outro lado, quando é visualizado o mercado 5% conservado, percebe-se que esses valores a caem consideravelmente chegando a mais de duas vezes menos emissões de CO₂.

Dando continuidade a análise através da conservação de energia. Segue mais algumas simulações realizadas no DHO Visual.

Para enriquecer ainda mais o nosso estudo, foi realizado uma simulação escolhendo uma hidrologia de dez anos. Escolheu-se para esse caso o decênio de 1946 a 1955, conforme Tabela 1

Tabela 1. Comparação Mercado Conservado

ANO	CONSERVAÇÃO ENERGIA	Custo Alternativa	Economia (%)	Emissão tCO2
1946 a 1955	NORMAL	1.55x10 ¹²		1.13x10 ¹⁵
	5%	5.95x10 ¹¹	62%	8.34x10 ¹⁴
	10%	3.21x10 ¹¹	79%	5.27x10 ¹⁴

Da Tabela 1, percebe-se o quanto custo total em R\$ reduz-se consideravelmente com a economia do mercado atingindo níveis de 70% de redução. Salienta-se também a redução considerável das emissões de CO₂. Ou seja, é de suma relevância para mitigação das emissões de CO₂ nesse país que se invista cada vez mais em políticas de eficiência energética.

Através da análise do decênio de 1946 a 1955, percebe-se mais uma vez valores consideráveis a título de custos e de emissões de CO₂.

Tabela 2. Resumo da otimização por CO₂ para o decênio de 1946-1955

ANO	CONSERVAÇÃO ENERGIA	Custo Alternativa	Acréscimo R\$ comparado	Emissão tCO2	Economia CO ₂ comparado
-----	---------------------	-------------------	-------------------------	--------------	------------------------------------



			a otimização por custo		a otimização por custo
1946 a 1955	NORMAL	1.70×10^{12}	0.15×10^{12}	1.08×10^{15}	0.05×10^{15}
	5%	7.76×10^{11}	1.81×10^{11}	7.90×10^{14}	0.44×10^{14}
	10%	3.43×10^{11}	0.22×10^{11}	4.97×10^{14}	0.30×10^{14}

Da Tabela 2, percebe-se que otimizando por CO₂, o custo pode até vim a elevar um pouco, mas, também a uma redução considerável das emissões de CO₂. Constata-se que considerando o mercado normal, só o fato da otimização por CO₂ as emissões evitadas foi da ordem de 0.05×10^{15} . Enquanto que o custo há um acréscimo da ordem de 0.15×10^{12} .

4 CONCLUSÃO

Os objetivos iniciais desse trabalho foram alcançados. Inicialmente foi feita uma análise do atual sistema elétrico brasileiro em seus principais aspectos, tanto na geração verificando a segurança energética e ambiental; como no consumo, ao se analisar o crescimento constante e gradual da carga e consequentemente o aumento nas emissões de gases de efeito estufa.

Algumas simulações para a geração e o consumo de energia elétrica foram implementados e constata-se que se continuar a projeção atual, a tendência é a cada ano que se passa as emissões provenientes da geração e do consumo aumentarem consideravelmente.

Em relação ao consumo, constata-se claramente que ainda existe um potencial muito grande de economia de energia elétrica através do uso de técnicas de eficiência energética, tais como, as propostas simuladas no sistema de bombeamento do LAMOTRIZ, podendo ser utilizada como protótipo de testes de grandes processos industriais que buscam aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade de energia desses sistemas. Salienta-se ainda que todo o trabalho de mitigação do consumo, pode ser implementado em sistemas motrizes industriais de uma forma geral, tais como, compressores e exaustores.

Assim, pelos resultados expostos acima, constata-se que é viável uma redução considerável de emissões de CO₂ no setor elétrico pela adoção de medidas de eficiência aplicadas a plantas industriais. Isto é, a mitigação de CO₂ no consumo de energia elétrica depende dos tomadores de decisão, visto que é notório o potencial desse setor na contribuição da redução de dióxido de carbono.

Por fim, em relação a geração, ficou claro que um bom planejamento energético pautado na otimização por CO₂ pode trazer ganhos significativos para o meio ambiente. De acordo com os resultados ficou claro que a mitigação pode ocorrer tanto pela ampliação do parque de energia nuclear como também pela otimização de CO₂. Pois, esta vai fornecer subsídios aos tomadores de decisão para escolher a térmica menos poluente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COPENHAGEN ACCORD - The United Nation Climate Change Conference. In: Copenhagen, 2009.
- [2] IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE. **Cambio climático**: informe de síntesis. Genebra, Suíça, 2007.
- [3] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2013. Paris: OECD/IEA, 2013.
- [4] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2009. Paris: OECD/IEA, 2009
- [5] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2008. Paris: OECD/IEA, 2008.



- [6] MCKINSEY. “Caminhos Para Uma Economia de Baixa Emissão de Carbono no Brasil”. McKinsey & Company, 47p, 2009.
- [7] LA ROVERE, E., PEREIRA, A., SIMÕES, A., PEEIRA, A., GARG, A., HALNAES, K., DUBEUX, C., COSTA, R., “Development First: Linking Energy and Emissions Policies with Sustainable Development for Brazil”. UNEP – RISØ Centre, 88p, 2007.
- [8] L. A. M. Fortunato, T. A. A. Neto, J. C. R. Albuquerque, e M. V. F. Pereira, “Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica”, Universidade Federal Fluminense, Brasil, 1990
- [9] CEPEL, “Modelo Decomp Manual de Referência”, Versão 11.0, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [10] N. A. Karmarkar, “A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming”, *Combinatorica* (4): 373–395, 1984
- [11] M. H. Wright, “The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences”, *Bulletin of The American Mathematical Society* 42(1): 39–56, 2004
- [12] LATEC; Relatório técnico 4: Desenvolvimento dos projetos piloto. Otimização do despacho hidrotérmico através de algoritmos híbridos com computação de alto desempenho. Instituto de tecnologia para o desenvolvimento; Disponível em : http://www.dhs.ufpr.br/pesquisas/Projeto%20PHOENIX/Relat%F3rios%20T%E9cnicos/Rel4_rev2.pdf; Acesso em 31 de março de 2015.
- [13] SAVOLAINEN, A., “Hacia um futuro major” *Revista ABB*, p.34-38, 2004.
- [14] ALMEIDA, A. T., FERREIRA, F. J. T. E. and BOTH, D., “Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems”. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* Vol 41, Nº1 January/February p. 188-199, 2005.
- [15] DE ALMEIDA, A. T., FERREIRA, F. J. T. E., FONSECA, P., CHERITIEN, B., FALKNER H., REICHERT, J. C. C., WEST, M., NIELSEN, S. B. and BOTH, D., “VSDs for Electric Motor Systems”.
- [16] AQUINO, R. R. B., LINS, Z. D., ROSAS, P. A. C., CORDEIRO, L. F. A., RIBEIRO, J. R., AMORIM, P. S., TAVARES, I. A., “Eficiência Energética no Controle e Automação de Processos Industriais”. *Eletrônica de Potência*, v. 14, p. 117-123, 2009.
- [17] AQUINO, R. R. B., LINS, Z. D., ROSAS, P. A. C., CORDEIRO, L. F. A., RIBEIRO, J. R., TAVARES, I. A., AMORIM, P. S., “Eficiência Energética em Métodos de Controle de Vazão”. *Eletricidade Moderna*, v. 425, p. 84-93, 2009.
- [18] AQUINO, R. R. B., LINS, Z. D., ROSAS, P. A. C., CORDEIRO, L. F. A., RIBEIRO, J. R., TAVARES, I. A., AMORIM, P. S., “EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA EM MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO”. In: VIII, 2008, POÇOS DE CALDAS. INDUSCON, 2008.