

Eixo Temático ET-06-010 - Energia

PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO COM FOCO NA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

Luiz Filipe Alves Cordeiro¹, Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino², Vilma Alves de Souza³

¹Doutorado em Engenharia Elétrica e Pesquisador do Laboratório de Eficiência Energética e Qualidade de Energia (LEEQE). Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Engenheiro Elétrico do Tribunal de Justiça de Pernambuco. Grupo de Trabalho em Sustentabilidade. E-mail: luiz.filipe@tjpe.jus.br. Autor para correspondência.

²Doutor e Professor Adjunto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: rrb@ufpe.br.

³Especialista em Construções Sustentáveis e Engenheira. Tribunal de Justiça de Pernambuco. Grupo de Trabalho da Presidência voltado à Sustentabilidade. E-mail: vilma.alves@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; Otimização Geração de Energia; Redes Neurais Artificiais.

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 (COPENHAGEN ACCORD, 2009). 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, 2007), 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 (COPENHAGEN ACCORD, 2009), 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 (IEA, 2013).

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 (IEA, 2009).

Nesse aspecto, percebe-se que a nível mundial, a União Europeia é líder na tomada de medidas para mitigar a mudança climática (IEA, 2008), 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.

Em 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 (2009) e La Rovere et al. (2007). 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 à 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.

Sendo assim, para contextualizar a realidade brasileira é de suma importância a análise da atual situação brasileira. Na Figura 1 é apresentado a evolução do consumo de energia elétrica no Brasil através da análise de uma série histórica de 1952 até 2016.

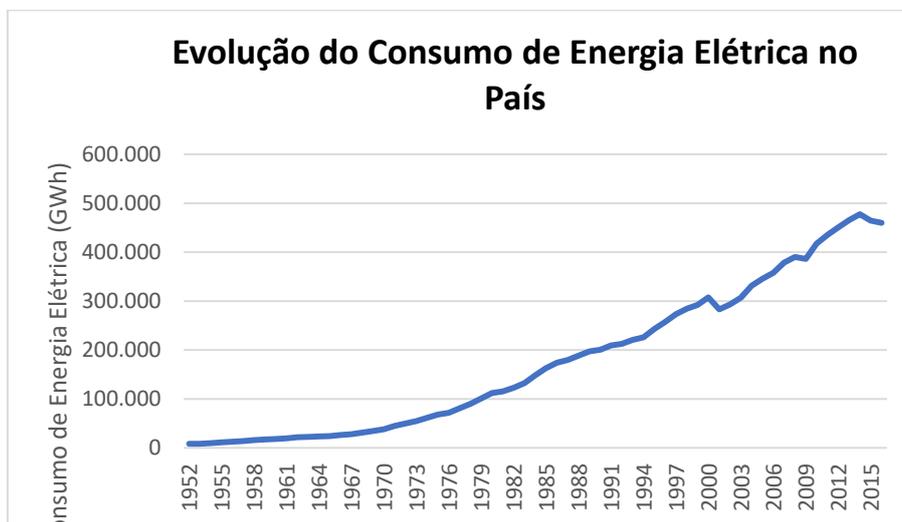


Figura 1. Consumo de Energia Elétrica no país em GWh Fonte: Elaboração própria a partir de IPEADATA/2016.

Observa-se que o crescimento do consumo de energia elétrica apresenta-se numa constante, exceto no ano de 2001, quando houve o racionamento no país. É importante salientar que as emissões de CO₂ está diretamente relacionada ao consumo de energia elétrica. Como exemplo, é possível analisar a série histórica das emissões de CO₂ emitidas pela energia elétrica na indústria. Na Figura 2 abaixo é apresentada a evolução das emissões de CO₂.

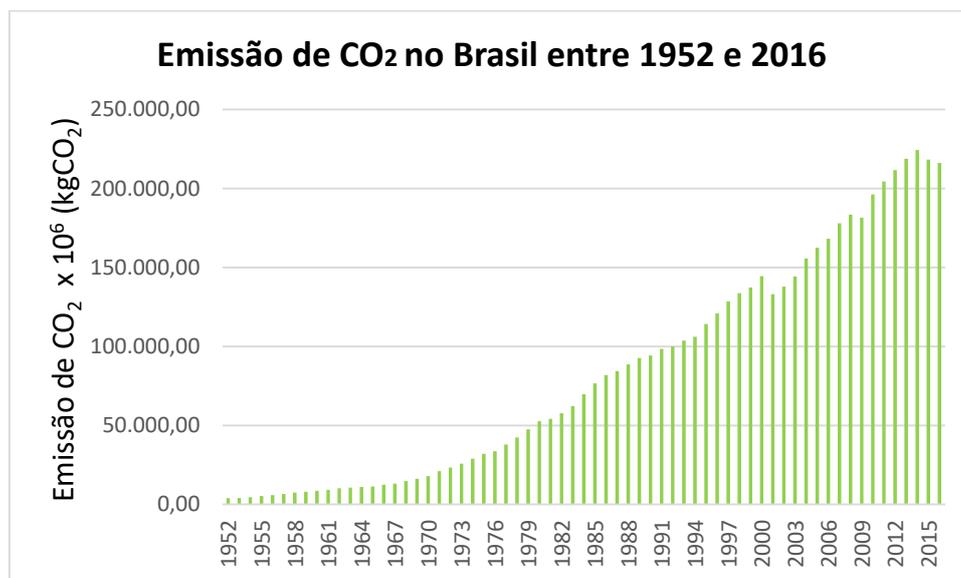


Figura 2. Emissões de CO₂ pelo consumo de eletricidade no Brasil entre 1952 e 2016. Fonte: Elaboração própria a partir de IPEADATA/2016.

O custo marginal de operação (CMO) é o custo para atender um aumento da demanda de energia elétrica, em um dado período de tempo, sem que haja expansão do sistema elétrico. Para isso, utiliza-se a reserva existente ou pode haver degradação na qualidade do serviço.

Em resumo, tem-se um quadro que justifica um estudo mais aprofundado, ou seja:

- o Brasil precisa combater as emissões de gases que causam o aquecimento global, referente às emissões provenientes da Geração com a utilização cada vez maior de térmicas.
- No lado do consumo, o setor industrial tem um papel importante no país e há indicações da existência de um elevado potencial de mitigação existente.
- Por fim, é urgente a necessidade da segurança energética e ambiental.

Com isso, esse trabalho propõe no lado da geração a otimização do sistema elétrico brasileiro baseado na otimização de CO₂ ao invés de custo como é realizado atualmente. E, no lado do consumo, a utilização de técnicas de redes neurais dedicadas a eficiência energética na indústria.

METODOLOGIA

Geração

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 (FORTUNARO et al., 1990). 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 (CEPEL, 2003). 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 (KARMAKAR, 1984; WRIGHT, 2004), 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), conforme Tabela 1. 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.

Tabela 1. Fator de Emissão por Tipo de Combustível.

Combustível	Unidade	TJ/UNID	Fator de Emissão de Carbono	Fração de Oxidação do Carbono	Emissão (tCO2/Un)	tC/KWh	tCO2/KWh
Oléo Diesel	1000m ³	35.52	20.2	0.99	2604.54	72.72	266.64
Oleo Combustível	10 ⁶ L	40.15	21.1	0.99	3075.21	75.96	278.52
Carvão	1000t	11.93	26.2	0.98	1106.01	94.32	345.84
Gás Natural	10 ⁶ m ³	36.84	15.3	0.995	2056.39	55.08	201.96

Função Objetivo

$$\min EMISS\tilde{O}ES = \min \sum_{t=1}^T \lambda t \cdot [\sum_{j=1}^J ETj(GTj, t) + \sum_{s=1}^S EDS(DEFs, t)] \quad (2.1)$$

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

Onde:

- λt : coeficiente de valor presente para o período t;
- GTj, t : geração da usina térmica i durante o período t [MWmês];
- ETj : emissões da usina térmica j para o período t [CO2];
- EDs : emissões do déficit do sistema s [CO2].

A função ET_j 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 [CO_2], 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 (LACTEC, 2008).

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 de minimizar as emissões de CO_2 ao invés da operação atual que visa ao menor custo e a segurança.

Vale a pena ressaltar que na sessão de resultados pode-se realizar 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.

Consumo

A melhoria da eficiência energética é considerada como a forma mais rápida e mais barata de reduzir as emissões de CO_2 , ela é vista como uma das medidas mais promissoras para a redução global das emissões de CO_2 (SAVOLAINEN, 2004). 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 (ALMEIDA et al., 2005, 2006).

Com isso, no intuito de promover ações que busquem a minimização das emissões de CO_2 , através do uso da eficiência energética foram desenvolvidos experimentos 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 CO_2 .

Salienta-se ainda que já foram obtidos resultados relevantes (AQUINO et al., 2008, 2009a, 2009b). 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 CO_2 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.

RESULTADOS

Resultados na Geração

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 3 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.

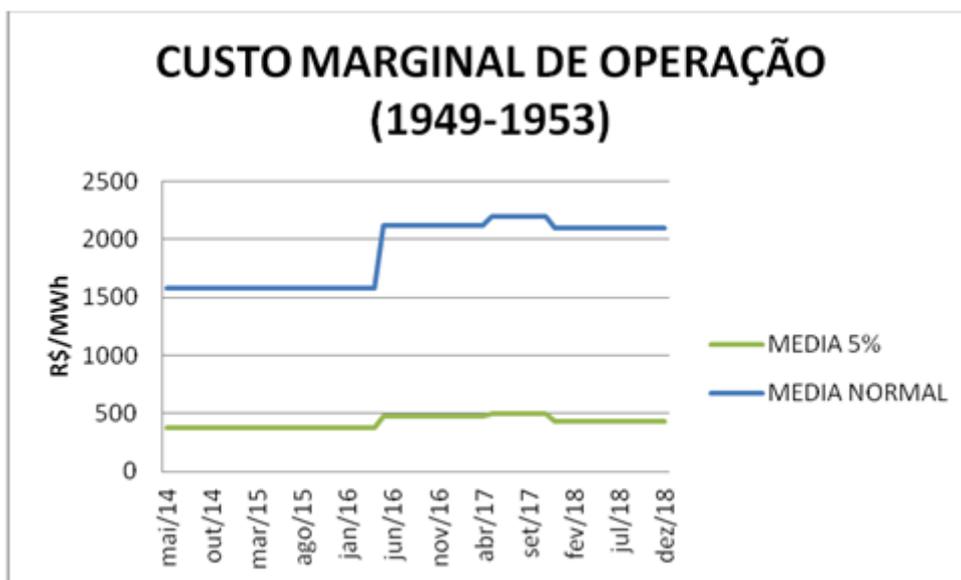


Figura 3. Custo Marginal da Média referente ao período hidrológico de 1949-1953.

Analisando a Figura 3, 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 3, 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 intitularemos 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 4 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.

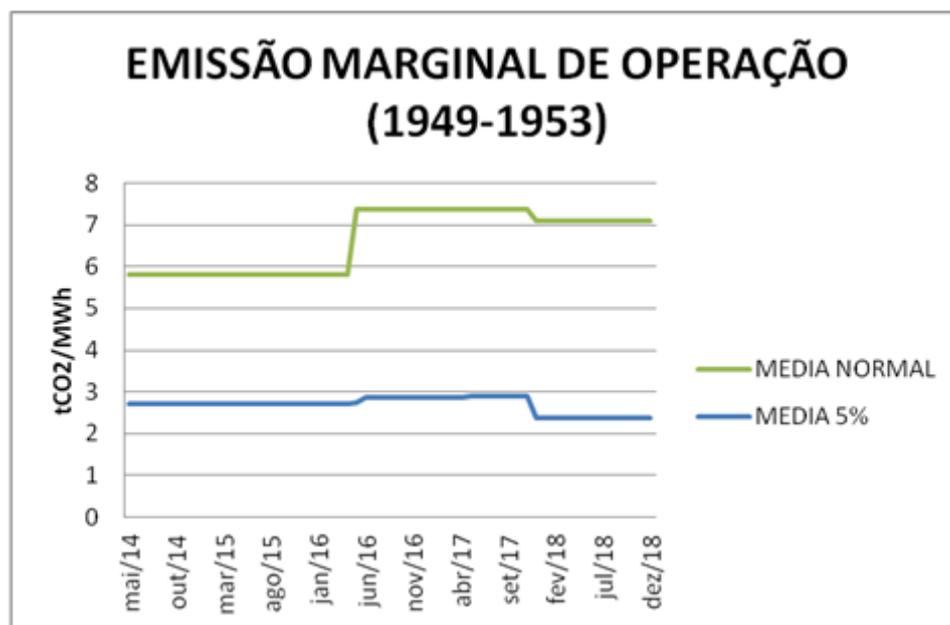


Figura 4. Emissão Marginal da Média referente ao período hidrológico de 1949-1953.

Através da análise da Figura 4, 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 2.

Tabela 2. Comparação Mercado Conservado.

ANO	Conservação energia	Custo alternativa	Economia (%)	Emissão tCO ₂
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

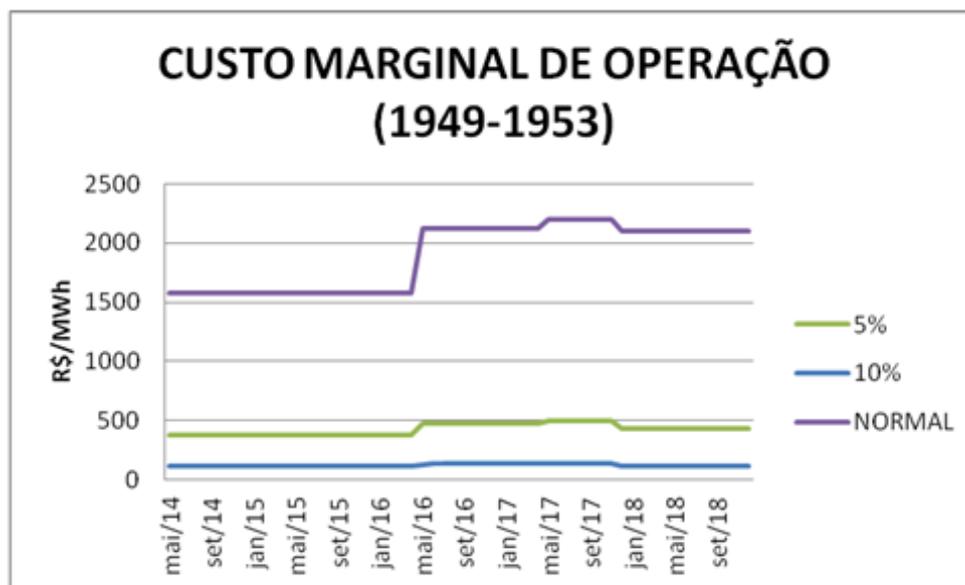
Da Tabela 2, percebe-se o quanto custo total em R\$ reduz-se consideravelmente com a economia do mercado atingindo níveis de 70% de redução. Salienta-se também a redução considerável das emissões de CO₂. Ou seja, é de suma relevância para mitigação das emissões de CO₂ nesse país que se invista cada vez 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 3. Resumo da otimização por CO₂ para o decênio de 1946-1955.

Ano	Conservação energia	Custo alternativa	Acréscimo R\$ comparado à otimização por custo	Emissão tCO ₂	Economia CO ₂ comparado à 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 3, percebe-se que otimizando por CO₂, o custo pode até vir a elevar um pouco, mas, também a uma redução considerável das emissões de CO₂. Consta-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} .

**Figura 5.** Comparação do Custo Marginal de Operação entre os mercados.

Para ilustrar melhor, na Figura 5, observa-se que o sistema normal é mostrado na roxa, enquanto que a curva verde e azul apresenta o sistema com a conservação de 5 e 10% respectivamente.

Resultados no controle

Inicialmente, os resultados apresentados na Tabela 3.4 são referentes à medida de substituição do controle de vazão do sistema por válvula estrangulada pela utilização do inversor de frequência.

Tabela 4. Índices de Economia utilizando Inversor de Frequência ao invés de Válvula Estrangulada.

Estrangulamento da Válvula	Economia
30%	6%
50%	39%
70%	74%

Observa-se que a simples troca da válvula estrangulada pelo inversor de frequência pode trazer ganhos de economia de energia considerados. É importante também frisar que

quando aplicado essa troca em grandes indústrias isso pode trazer inúmeros ganhos de economia de energia e conseqüentemente menos emissões de CO₂.

Sendo assim, constata-se que se aplicada técnicas semelhantes a essa, nas indústrias que ainda utilize o controle por válvula estrangulada, poderia se obter reduções de emissões nesses sistemas de até 70%.

A Tabela 5 apresenta a segunda análise referente ao consumo. Nesse caso, a comparação é feita não só pela utilização do inversor de frequência, mas também com ferramentas de inteligência artificial dedicada eficiência energética.

Tabela 5. Comparação do consumo de energia para reservatório a 3m com e sem RNA.

Volume (L)	Energia consumida (s/RNA) (W.h)	Energia consumida (c/RNA) (W.h)	Economia (W.h)	%
50	28	19	9	32,1
100	56	38	18	32,1
150	83	57	26	31,3
200	110	76	34	30,9
300	165	112	53	32,1
400	219	148	71	32,4
500	275	188	87	31,6

Os dados obtidos através de experimentos reais apresentam uma sensível redução no consumo de energia. Em termos percentuais, com a RNA controlando o sistema os ganhos são da ordem de 30%. Pode-se observar também que a economia de energia (W.h) aumenta significativamente com o aumento do volume requerido. Ou seja, em sistemas de grande porte (milhares de litros) a economia de energia será significativa.

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 redução nas emissões de até 30% quando utilizado em sistemas industriais que já apresentam algum avanço como a utilização do inversor de frequência.

Vale ressaltar também que se comparado com o controle de vazão tradicionalmente utilizado na indústria (estrangulamento de válvula) essa economia de energia é bem maior para obter a mesma vazão, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Comparação do consumo de energia para os reservatório a 3m com RNA e com controle tradicional (estrangulamento de válvula).

Volume (L)	Energia consumida (válvula estrangulada) (W.h)	Energia consumida (c/RNA) (W.h)	Economia (W.h)	%
50	40	19	21	52,5
100	85	38	47	55,3
150	121	57	64	52,9
200	170	76	94	55,3
300	252	112	140	55,6
400	335	148	187	55,8
500	419	188	231	55,1

Os dados apresentados na Tabela 6 demonstram uma elevada economia de energia ao ser aplicado o controle inteligente ao invés do controle tradicional (estrangulamento de válvula) resultando em uma economia da ordem de 55%.

Como se pode observar quando a comparação é feita com sistemas que não existem inversores de frequência (ainda muito comum na indústria brasileira), a redução de CO₂ ultrapasse os 50%. É importante frisar que, embora os resultados tenham sido obtidos de sistemas de bombeamento, a ideia do controle eficiente com redes neurais pode ser implantado em qualquer sistema industrial.

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 conseqüentemente 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.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; BOTH, D. Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, v. 41, n. 1, p. 188-199, 2005.

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; FONSECA, P.; CHERITIEN, B.; FALKNER, H., REICHERT, J. C. C.; WEST, M.; NIELSEN, S. B.; BOTH, D. VSDs for electric motor systems.

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, 2009a.

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, 2009b.

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. Anais do VIII INDUSCON, 2008.

CEPEL. Modelo Decomp Manual de Referência. Versão 11.0. Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, Brasil, 2003.

COPENHAGEN ACCORD - The United Nation Climate Change Conference. Copenhagen, 2009.

FORTUNATO, L. A. M.; NETO, T. A. A.; ALBUQUERQUE, J. C. R.; PEREIRA, M. V. F. Introdução ao planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de energia elétrica. Rio de Janeiro Universidade Federal Fluminense, Brasil, 1990.

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook 2008. Paris: OECD/IEA, 2008.

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook 2009. Paris: OECD/IEA, 2009

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook 2013. Paris: OECD/IEA, 2013.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE. **Cambio climático**: informe de síntesis. Genebra, Suíça, 2007.

KARMAKAR, N. A. A new polynomial time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, v. 4, p. 373-395, 1984.

LA ROVERE, E.; PEREIRA, A.; SIMÕES, A.; PEREIRA, A.; GARG, A.; HALNAES, K.; DUBEUX, C.; COSTA, R. Development first: linking energy and emissions policies with sustainable development for Brazil. UNEP - RISØ Centre, 2007.

LACTEC. 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 mar. 2015.

MCKINSEY. Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil. McKinsey & Company, 2009.

SAVOLAINEN, A. Hacia um futuro major. **Revista ABB**, p.34-38, 2004.

WRIGHT, M. H. The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences. **Bulletin of The American Mathematical Society**, v. 42, n. 1, p. 39-56, 2004.