

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE HIDRELÉTRICAS A FIO D'ÁGUA

Leonardo Augusto da Fonseca Parracho Sant'Anna
COPPE-UFRJ

Marcos Estellita Lins
COPPE-UFRJ

Data Envelopment Analysis is applied here in order to provide efficiency measures to hydroelectric power plants without water reservoirs of meaningful size.

Many of the Decision Making Units analyzed here are under construction. Therefore, besides identifying improvements to the inefficient units, we attempt to establish which plants should be constructed first.

The variable selection, accomplished using the Stepwise I – O procedure, is presented here step-by-step.

ÁREA DE TRABALHO: PESQUISA OPERACIONAL
SUB-ÁREA DE TRABALHO: PESQUISA OPERACIONAL

KEYWORDS: Data Envelopment Analysis - Hydroelectric Power plants - Stepwise I – O.

1. Introdução

Usinas a fio d'água são aquelas hidrelétricas que operam sem um reservatório de volume significativo para o armazenamento de água. No Brasil, há hoje muitas destas unidades em fase de projeto. É uma necessidade do planejamento elétrico brasileiro definir os melhores aproveitamentos para estabelecer prioridades em seu cronograma de obras e, possíveis, alterações em projetos em andamento.

Utilizamos, aqui, a Análise de Encapsulamento de Dados (DEA) de Charnes, Cooper e Rhodes (1978), para determinar desempenhos ótimos e, em relação a estes, eficiências relativas de usinas definidas por um conjunto de variáveis observadas.

O cálculo dos desempenhos ótimos e das eficiências relativas tem de ser precedido de uma etapa de modelagem com a seleção das variáveis relevantes. Nesta etapa, de determinação do modelo a ser considerado, utilizamos o método de inclusão de variáveis Stepwise I-O proposto por Estellita para o 9º CLAIO – Congresso Latino-iberoamericano de Investigación Operativa.

Na Seção seguinte, descrevemos as variáveis consideradas e apresentamos os dados explorados na análise. Na Seção 3, realizamos a análise dos dados. Na Seção 4, apresentamos as conclusões que se podem extrair dos resultados da análise, em termos de potencial de melhoria.

2. Base de Dados

Utilizamos os dados cadastrados no banco de dados SIPOT (Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro) mantido pela Diretoria de Planejamento da

ELETROBRÁS. Para evitar constrangimentos quanto à publicação de dados de usinas em fase de licitação, identificaremos as unidades avaliadas por um número, ou seja, usina hidrelétrica 1 (UHE1), usina hidrelétrica 2 (UHE2) e assim por diante.

As variáveis consideradas em nossa avaliação são as seguintes:

- Custo de Construção;
- Queda Representativa;
- Volume Máximo;
- Média de Longo Prazo da Vazão (MLT);
- Energia Firme;
- Energia Média;
- Potência Garantida.

Destas variáveis, as quatro primeiras correspondem a inputs, sendo as três primeiras inputs controláveis e a Quarta, Média de Longo Prazo da Vazão (MLT), não controlável. As variáveis que expressam os outputs são as três últimas: Energia Firme, Energia Média e Potência Garantida.

A variável Custo de Construção teve seus valores convertidos da moeda corrente da época para dólares americanos do respectivo ano para possibilitar comparações entre as unidades. Não consideramos, nesta primeira análise, eventuais valorizações do dólar em relação a outras moedas ao longo dos anos.

A Queda Representativa é uma medida de tamanho da usina hidrelétrica. É calculada pela diferença entre o nível de armazenamento máximo do reservatório e o nível de seu canal de fuga, descontando-se, ainda, as perdas hidráulicas. Usada no cálculo da *Produtibilidade Representativa* (estimada como o produto da queda de referência pelo rendimento da turbina pelo fator de correção 0,00981) do aproveitamento, constitui um importante indicador de eficiência.

O Volume Máximo do reservatório de uma determinada usina hidrelétrica expressa, assim como a queda representativa, o seu tamanho. O volume do reservatório é um indicador importante, porque também expressa a capacidade de um aproveitamento gerar mais energia elétrica para atender o horário de maior demanda do sistema, ou seja, a sua capacidade de regularização.

A Média de Longo Prazo da Vazão de um determinado aproveitamento hidráulico é a vazão média mensal afluyente de uma determinada usina ao longo do período de 1932 a 1994. Para as usinas hidrelétricas a fio d'água tal valor dá uma boa indicação de quanto tal usina poderá gerar.

A variável Energia Firme expressa a quantidade de energia sempre disponível para a usina em estudo. É calculada pela energia média pôde ser gerada pela usina, ao longo do Período Crítico do Sistema Interligado Brasileiro. O Período Crítico do Sistema é aquele no qual o seu nível de armazenamento varia do máximo até o mínimo. Em nosso caso se inicia em maio de 1952 e termina em novembro de 1956.

A Energia Média apresentada neste trabalho é a média da geração possível da usina ao longo dos anos. Tal média exclui o período crítico sendo levados em conta os meses subsequentes a novembro de 1956 até dezembro de 1994.

A Potência Garantida é um indicador bastante utilizado no setor elétrico para a determinação de quanto um determinado aproveitamento pode gerar em seu horário de pico. Sua medida é obtida a partir da Potência Instalada e da Taxa de Indisponibilidade Forçada (TEIF) das máquinas.

A tabela a seguir registra os dados colhidos.

TABELA I. USINAS A FIO D'ÁGUA

CODNOME	CusCons (MILHÕES U\$)	EneFir (MWméd)	QueRep (m)	PotGar (MW)	VazMLT (m³/s)	EneMed 57-94 (MWméd)	VolMax (m³/100000)
UH1	972	187	44	414	905	257	230000
UH2	91	8	27	16	65	11	881
UH3	75	22	35	30	83	26	10800
UH4	68	61	167	110	45	61	145
UH5	263	64	116	130	85	73	1150
UH6	1086	163	79	344	396	195	190200
UH7	46	34	75	56	59	35	1900
UH8	118	31	69	39	61	33	385
UH9	107	30	68	39	61	32	900
UH10	27	9	197	23	9	15	28
UH11	414	58	91	138	95	66	26500
UH12	321	55	50	103	146	61	8904
UH13	87	28	187	51	33	40	1088
UH14	83	27	53	55	101	37	14650
UH15	79	13	23	17	83	13	3642
UH16	135	37	78	55	81	44	7

3. Análise Gráfica

A metodologia que aplicamos toma por base a matriz de correlação entre as variáveis consideradas. Esta matriz é apresentada a seguir.

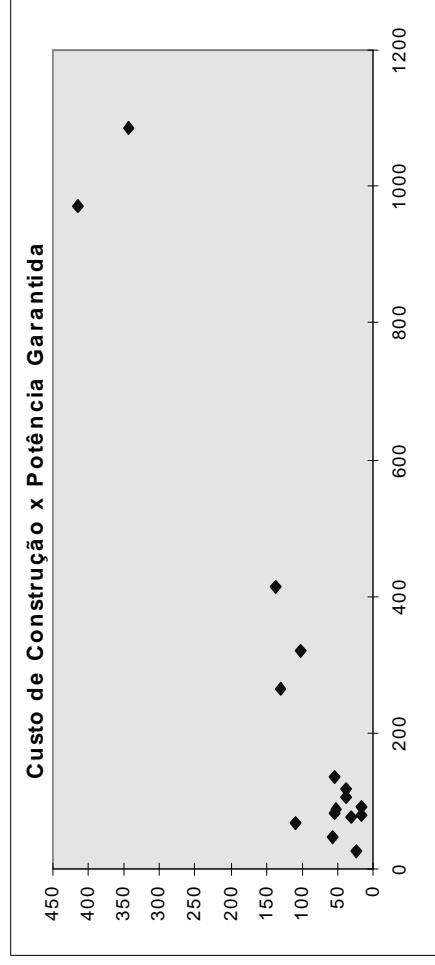
TABELA II. Matriz de Correlação I

I	O	I	O	I	O	I	O	I	O
CusCons	EneFir	QueRep	PotGar	VazMLT	EneMed57-94	VolMax			
I	CusCons	1							
O	EneFir	0,95	1						
I	QueRep	-0,10	0,99	1					
O	PotGar	0,96	-0,09	0,90	1				
INC	VazMLT	0,85	-0,29	0,99	0,93	1			
O	EneMed57-94	0,95	-0,11	0,99	0,94	0,96	1		
I	VolMax	0,95	-0,20	0,95	0,94	0,96	0,96	1	

O primeiro passo da modelagem consiste na avaliação da presença de rendimentos de escala. Para isto, analisamos gráficos em que plotamos pares de valores de inputs e outputs. Estes pares são escolhidos, com base na matriz de correlação. Selecionam-se os pares input-output com maiores correlações. Considerando que há diversos pares com correlações muito altas, selecionamos três pares considerados pelos especialistas mais significativos para o problema: Custo de Construção e Potência Garantida, Vazão Média de Longo Prazo e Energia Firme e, finalmente, Custo de Construção e Energia Firme.

Estes gráficos estão dispostos a seguir.

GRÁFICO I



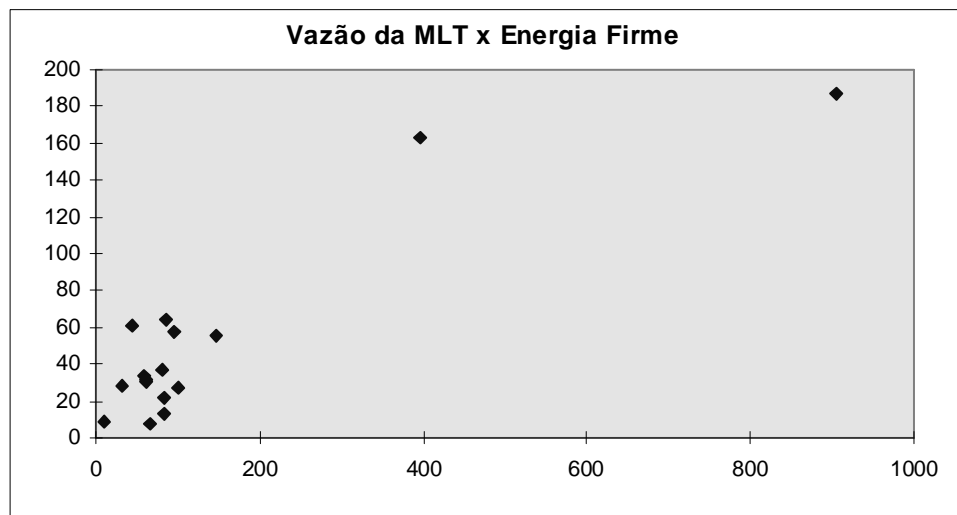


GRÁFICO II

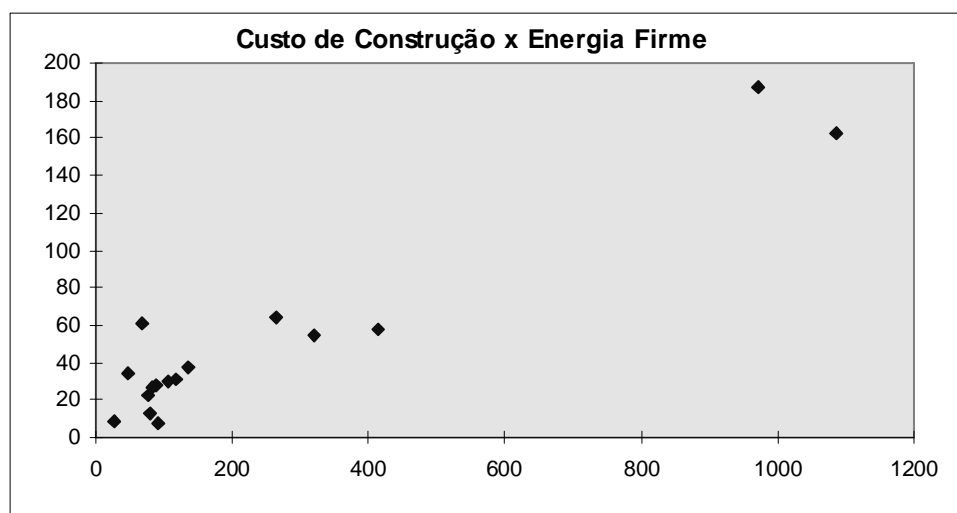


GRÁFICO III

Ao analisarmos os gráficos, observamos que indicam um crescimento linear de seus outputs ao aumentarmos os inputs até certo ponto. Há entretanto, alguns pontos nas extremidades dos gráficos que não mantêm o comportamento linear dos demais. Esses pontos são indicativos de rendimento variável de escala. Por esta razão, optamos pelo modelo DEA de Retorno Variável de Escala - VRS (Variable Return to Scale).

A segunda escolha a ser feita diz respeito à orientação do modelo. Como os outputs Energia Firme e Potência Garantida são considerados pelos especialistas os indicadores mais importantes dentre as variáveis disponíveis, adotamos a modelagem DEA voltada para o Output. Chegamos, assim, ao modelo VRS-O.

A terceira etapa da modelagem consiste na seleção das variáveis que melhor representam o problema. Nesta etapa, utilizamos o método Stepwise I-O. O primeiro passo deste procedimento é a escolha do primeiro par input-output. Escolhemos o par considerado o mais representativo. Tal escolha espelha a prática comum do setor, que tem a variável Potência Garantida como característica fundamental dos aproveitamentos do

Setor Elétrico Brasileiro. Em seguida empregamos o modelo VRS/O e calculamos o seu vetor de scores de eficiência. Calculamos, então, a correlação do vetor de observações de cada variável com o vetor de scores do modelo. Incluímos, então, entre as variáveis do modelo o input de maior correlação positiva ou o output de maior correlação negativa com o score, desempateando pelo maior valor absoluto. Os passos desse procedimento estão apresentados a seguir. A Tabela abaixo apresenta as correlações.

TABELA III

Iteração	Score Médio	CusCons	EneFir	Correlações com o Score Médio					VolMax
				QueRep	PotGar	VazMLT	EneMed		
1	56,88	0,42	0,56	0,53	0,57	0,40	0,55	0,44	
2	78,61	0,11	0,20	-0,06	0,22	0,26	0,21	0,25	
3	92,34	0,25	0,23	-0,24	0,28	0,23	0,22	0,25	
4	96,56	0,18	0,16	-0,42	0,17	0,17	0,14	0,15	

O par inicial em nosso modelo foi Custo de Construção x Potência Garantida. Para este primeiro modelo o Score Médio encontrado foi da ordem de 57%.

Observamos na tabela acima que a próxima variável a ser incorporada em nosso modelo foi o input Queda Representativa.

Na segunda linha da Tabela III verificamos que a quarta variável incluída no modelo foi o input não-controlável Vazão MLT.

Do mesmo modo, a terceira linha da Tabela III mostra que o Volume Máximo foi escolhido como a quinta variável a ser incluída no modelo. Mais uma vez há uma inclusão de um input.

O critério de parada do procedimento Stepwise I-O é a ausência de inputs com correlação positiva e outputs com correlação negativa com o score de eficiência. Neste ponto a entrada de novas variáveis não elevará o score médio de eficiência, o que significa que novas variáveis não explicarão melhor o problema. Após a inclusão da quinta variável, o método Stepwise não sugere a inclusão de outras variáveis o que significa que chegamos ao nosso modelo final de análise de eficiência, totalizando um score médio de eficiência de aproximadamente 97%.

Observando o problema sob outro ângulo, observamos que os inputs e Outputs em nosso modelo sempre crescem com o tamanho da Usina Hidrelétrica. Observamos, por outro lado, que o score de eficiência esteve sempre correlacionado positivamente com as variáveis nos diversos passos de execução do procedimento Stepwise I-O para escolher as novas variáveis a entrar no modelo. Isto nos leva a Concluir que, globalmente, para o conjunto de usinas analisado, o aumento da eficiência está ligado ao aumento do tamanho da Usina. O fato de termos usado uma abordagem de retornos variáveis de escala, desenhada para evitar que apareçam nos scores de eficiência os efeitos da escala, fortalece ainda mais esta conclusão.

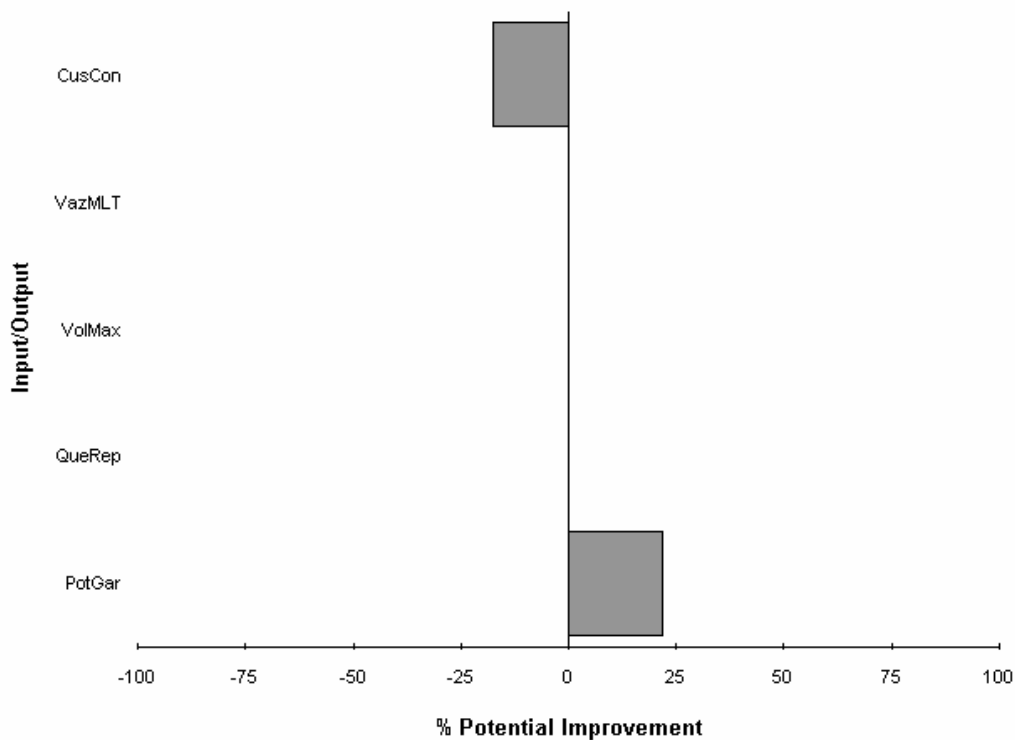
Tal observação nos leva a concluir que as vazões das usinas hidrelétricas, nosso input não controlável estão sendo, em geral, sub-aproveitadas nos casos das usinas analisadas. Sendo assim, maiores investimentos seriam indicados para elevar a eficiência na produção energética. Esta conclusão vai ao encontro da conclusão adiantada por Färe et alii(1985), de que as usinas públicas operam, em geral, em uma escala inferior à ótima.

4. Potencial de Melhoria

Para melhor entendermos o resultado de nossa avaliação de eficiência analisamos as unidades de produção com maior potencial de melhoria, ou seja, as mais ineficientes. Essas unidades ineficientes são a UHE8 e a UHE13.

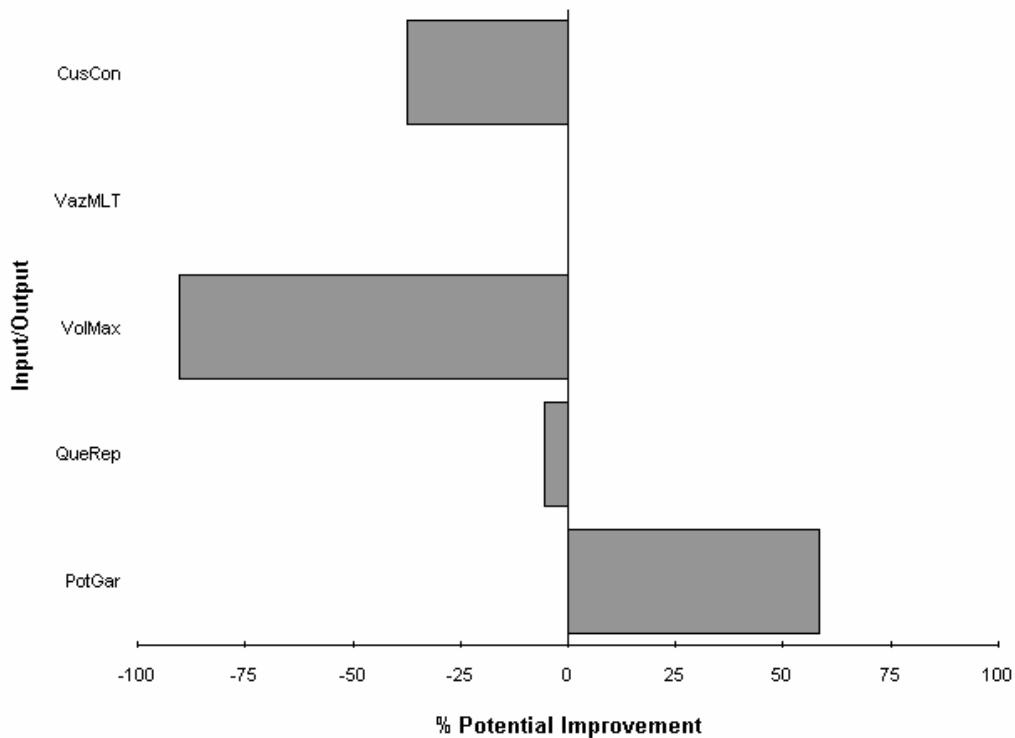
Abaixo apresentamos os potenciais de melhoria da UHE8. Podemos perceber que o modelo indica que tal unidade está sendo improdutiva no que diz respeito ao output Potência Garantida, a um Custo de Construção elevado.

GRÁFICO IV



A seguir apresentamos os potenciais de melhoria da UHE13, que em nossa análise foi a unidade mais ineficiente. Verificamos que ao contrário das demais unidades, a unidade UHE13 aproveita de forma muito ineficiente os recursos que dispõe. Basicamente, verificamos que a dimensão desta UHE não é adequada a sua capacidade de produção.

GRÁFICO IV



5. Conclusões

Consideramos como resultados fundamentais deste trabalho os indícios de que o aumento da eficiência das Unidades de Produção está ligado ao aumento do tamanho das Usinas. Este fato indica que os projetos realizados deveriam, em alguns casos, ter suas dimensões ampliadas, isto é, a análise aponta a necessidade de maiores investimentos para alcançar um nível de produção mais eficiente.

Destaca-se, também, o sucesso do método Stepwise I-O, que tem como objetivo básico encontrar o conjunto de variáveis que melhor represente o problema analisado. Tal fato espelha-se no incremento observado a cada passo da eficiência média. Com a inclusão das novas variáveis asseguramos que a fronteira eficiente não é formada por casos excepcionais e sim pelas unidades de fato mais eficientes.

Referências

- Charnes, Cooper e Rhodes (1978). Measuring the Efficiency of Decision-Making Units. *EJOR*, 2, 429-444.
- Estellita Lins 9º CLAIO – Congresso Latino-iberoamericano de Investigación Operativa.
- Färe, R, Grosskopf, S. e Logan, J. (1985) The Relative Performance of Publicly Owned and Privately-Owned Electric Utilities. *Journal of Public Economics*, 26, 89-106
- SIPOT - Diretoria de Planejamento da Eletrobrás, 1998.