

I-125 - DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO HIDROENERGÉTICO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Heber Pimentel Gomes⁽¹⁾

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba.

Moisés Menezes Salvino

Doutor pesquisador do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica da UFPB.

Luiz Simão de Andrade Filho

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba.

Pedro Augusto Silva Sabino de Farias

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Graziela Lopes de Sousa

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba. Aluna de Iniciação Científica-CAPES

Endereço⁽¹⁾: Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco III, João Pessoa - PB, 58051-900 - Brasil - e-mail: heberp@uol.com.br

RESUMO

No contexto dos sistemas de abastecimento de água, os custos energéticos representam o segundo item mais oneroso nas empresas de saneamento, ficando atrás somente dos custos da mão-de obra. Associada à preocupação com um consumo mais consciente dos recursos naturais, surge a necessidade de indicadores que representem o desempenho dos sistemas de abastecimento em relação ao consumo energético, necessário ao transporte de água nas redes de tubulações urbanas. Inexiste, na bibliografia especializada, algum indicador que seja capaz de aferir a eficiência energética de determinada rede de distribuição de água. Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento de um indicador, denominado de Indicador de Eficiência Energética (IEE), que possibilite, aos operadores das companhias de saneamento, o controle do comportamento hidráulico e energético da rede de distribuição de água a partir da comparação entre a operação da rede em um cenário de referência (em geral o de projeto) e o cenário para o qual se deseja analisar essa eficiência. Para tanto, analisou-se uma rede de abastecimento de água em diversas situações operacionais, ao longo da vida útil do projeto, com relação à capacidade de transporte de água das tubulações. Os resultados obtidos foram bastante coerentes, possibilitando a geração de informações aos gestores e técnicos das concessionárias de abastecimento no tocante a possíveis necessidades de intervenção de reabilitação nas redes analisadas. Foi elaborado um estudo de caso para a rede de abastecimento da cidade de Itororó, Bahia, Brasil, cujos resultados constataram a validade do indicador proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Indicadores de desempenho, Redes de água, Eficiência energética.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento urbano de água, constituídos pelas adutoras, redes de tubulações de distribuição de água e instalações elevatórias, são projetos, em geral, muito onerosos e, ao mesmo tempo, fundamentais para a geração do bem-estar social. Os investimentos, incluindo gastos de operação e manutenção, são, igualmente, bastante elevados. Gomes (2009b) destaca que os subsídios fornecidos pelo poder público com o objetivo de promover a redução dos dispêndios com água e energia, fundamentais aos projetos de saneamento, têm se reduzido consideravelmente nas três últimas décadas, tanto no Brasil quanto no mundo. Tal diminuição, sobretudo nas tarifas de energia elétrica, tem aumentado, significativamente, os dispêndios com energia nas empresas concessionárias de abastecimento de água.

Esses dispêndios, em muitas empresas prestadoras de serviços de saneamento, constituem o segundo item dos custos de exploração, sendo inferiores apenas aos gastos com mão-de-obra de modo geral. Outro problema de relevância, segundo Gomes (2009b), consiste nas perdas de água que existem, muitas vezes de forma inevitável, nos sistemas de abastecimento urbano. Tal problema tem se agravado, ao longo do tempo, por diversas razões, tais como: envelhecimento das instalações, expansões desordenadas dos sistemas urbanos de abastecimento, ausência de sistemas adequados de medição e problemas de gestão operacional.

Assim, é cada vez mais imperativa a necessidade de melhoria das condições hidráulicas e energéticas de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento, a fim de garantir todos os benefícios técnicos, sociais, econômicos e ambientais, por meio, por exemplo, da implementação de intervenções de reabilitações nas redes. É justamente nesse contexto que surge a figura dos indicadores de desempenho hidroenergético das redes de distribuição de água.

Uma significativa quantidade de literatura especializada está disponível sobre a aplicação dos indicadores em sistemas de abastecimento de água diversos. Exemplos importantes recentemente publicados podem ser encontrados em Vilanova e Balestieri (2015); Nudurupati et al. (2011); Vilanova, Magalhães Filho e Balestieri (2015); Alegre et al. (2004) e Vilanova (2012).

De maneira geral, os indicadores de desempenho possibilitam a transposição de um conhecimento científico de natureza física ou social para unidades de informação gerenciáveis e que, dentre outros fatores: facilitam a tomada de decisões; auxiliam a medir e calibrar a progressão feita, dando meios para avaliar o quanto já foi atingido e os eventuais desvios; e constituem um sistema de alerta antecipado para evitar a instalação de situações indesejáveis, a ocorrência de danos irrecuperáveis ou, simplesmente, a ultrapassagem de limites pré-estabelecidos (MARANHÃO, 2007).

Tendo em vista, cada vez mais, a premente necessidade de melhoria das condições hidráulicas e energéticas de operação dos sistemas de abastecimento, surge a necessidade de se dispor de um indicador de desempenho, que permita auferir se uma determinada rede está ou não com alguma incapacidade de transporte de água. O valor desse indicador poderá servir de base para saber se uma determinada rede de distribuição de água necessita, ou não, de reabilitação, com vistas a melhorar a sua capacidade de transporte das vazões demandadas pelo sistema.

Este trabalho tem por objetivo **desenvolver e aplicar uma metodologia para a obtenção de um índice e de um indicador de eficiência energética**, que sirva de parâmetro de análise para avaliação da capacidade de transporte de água nas tubulações de uma rede de abastecimento.

METODOLOGIA

Para a pesquisa em questão, propõe-se um modelo baseado na aplicação de um índice e de um indicador de desempenho que, inter-relacionados, possam enriquecer, consideravelmente, a análise sobre a eficiência energética e hidráulica de um determinado sistema urbano de distribuição de água.

O primeiro deles, denominado de **Índice de Energia Dissipada na Rede de Distribuição (IED)**, relaciona a perda de carga hidráulica em todos os trechos de tubulações da rede à extensão total desta mesma rede, proporcionando, assim, um valor numérico (na unidade mca/km, por exemplo) que permite julgar o quanto uma determinada rede está dissipando energia do ponto de vista hidráulico (com implicações, portanto, em vários outros, sobretudo o financeiro).

As perdas de carga hidráulicas entre duas seções da mesma tubulação, em um escoamento permanente, podem ser obtidas, além da aplicação das fórmulas tradicionais (tais como Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Flamant, Scobey ou Chezy), pelas subtrações das cargas hidráulicas (ou piezométricas) entre as seções de montante e jusante, respectivamente, de tal tubulação. Nesse sentido, o Índice de Energia Dissipada na Rede de Distribuição proposto pode ser calculado, para cada rede de distribuição em análise, pela razão entre o somatório de todas as diferenças de carga hidráulica entre os nós de montante e jusante referentes a cada um dos trechos da rede, e a extensão total da rede. Ou seja:

$$i_{ED} = \frac{h_{f\ total}}{L_{total}} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \right]_i}{L_{total}} \right\} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

- i_{ED} é o índice de energia dissipada da rede;
- $h_{f\ total}$ é o valor referente à perda de carga hidráulica total da rede;

- i é o trecho (tubulação) em análise;
- n é a quantidade de trechos (tubulações) da rede;
- $\frac{P_1}{\gamma}$ é a parcela de energia de pressão do nó de montante do trecho;
- $\frac{P_2}{\gamma}$ é a parcela da energia de pressão do nó de jusante do trecho;
- z_1 e z_2 são as cotas topográficas dos nós de montante e jusante do trecho, respectivamente;
- L_{total} é o comprimento total da rede.

O segundo elemento caracterizador dessa pesquisa, e o mais representativo, é denominado de **Indicador de Eficiência Energética de Rede (IEE)**. Tal indicador consiste, fundamentalmente, na aplicação do índice anteriormente explicado, para uma determinada rede de distribuição em duas situações distintas: a primeira, tida como referencial, pode, por exemplo, corresponder ao cenário efetivamente previsto para a vida útil do projeto, direcionado para um horizonte futuro de operação (com as demandas previstas de vazão e de rugosidades das tubulações). Já a segunda situação remete ao cenário em que, efetivamente, deseja-se aferir a eficiência de operação da rede, ao longo do tempo (seja antes ou depois do horizonte de projeto inicialmente concebido). Assim, em termos matemáticos, tem-se que:

$$I_{EE} = \frac{i_{ED}(\text{referência})}{i_{ED}(\text{cenário})} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

- I_{EE} é o indicador de eficiência energética da rede
- $i_{ED, \text{referência}}$ é índice de energia dissipada da rede para o cenário de referência na aferição da eficiência energética da rede; e
- $i_{ED, \text{cenário}}$ é índice de energia dissipada da rede para o cenário que se deseja aferir a eficiência energética da rede.

Um valor de 100% do I_{EE} indica, no limite, que a rede analisada está em ótimas condições operacionais, em termos hidráulicos e energéticos, em relação ao seu projeto original. Por outro lado, um valor acima de 100% indica que a rede está eficiente, visto que ainda há uma “folga” de perda de carga a ser consumida, em relação às condições operacionais previstas no projeto original. Já um valor inferior a 100% denota que a rede está ineficiente hidráulicamente, uma vez que está consumindo mais carga hidráulica do que foi inicialmente prevista no cenário de referência. Como consequência, nesse último caso, as pressões efetivas disponíveis nos nós da rede caem, prejudicando a qualidade do serviço do abastecimento aos consumidores do sistema de distribuição de água.

Dessa forma, será possível comparar a evolução da eficiência de determinada rede, ao longo do tempo e, assim, fornecer subsídios aos tomadores de decisão das concessionárias de saneamento para que possam tirar todas as possíveis conclusões técnicas acerca, por exemplo, de eventuais intervenções necessárias de reabilitação, bem como perspectivas de ampliação, em função do aumento, não inicialmente previsto, das demandas (gerado, por exemplo, a partir da intensificação de processos de urbanização e verticalização no uso do solo urbano). Pode-se verificar, ainda, o valor desse indicador para uma determinada rede, cujas rugosidades dos tubos se deterioraram ao longo do tempo.

Com o objetivo de aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho, estudou-se uma rede inicialmente analisada por Dacach (1975). Trata-se de uma rede de distribuição real, localizada na cidade de Itororó (BA). Seu traçado, com a devida especificação de seus 20 trechos e 18 nós segue na Figura 01.

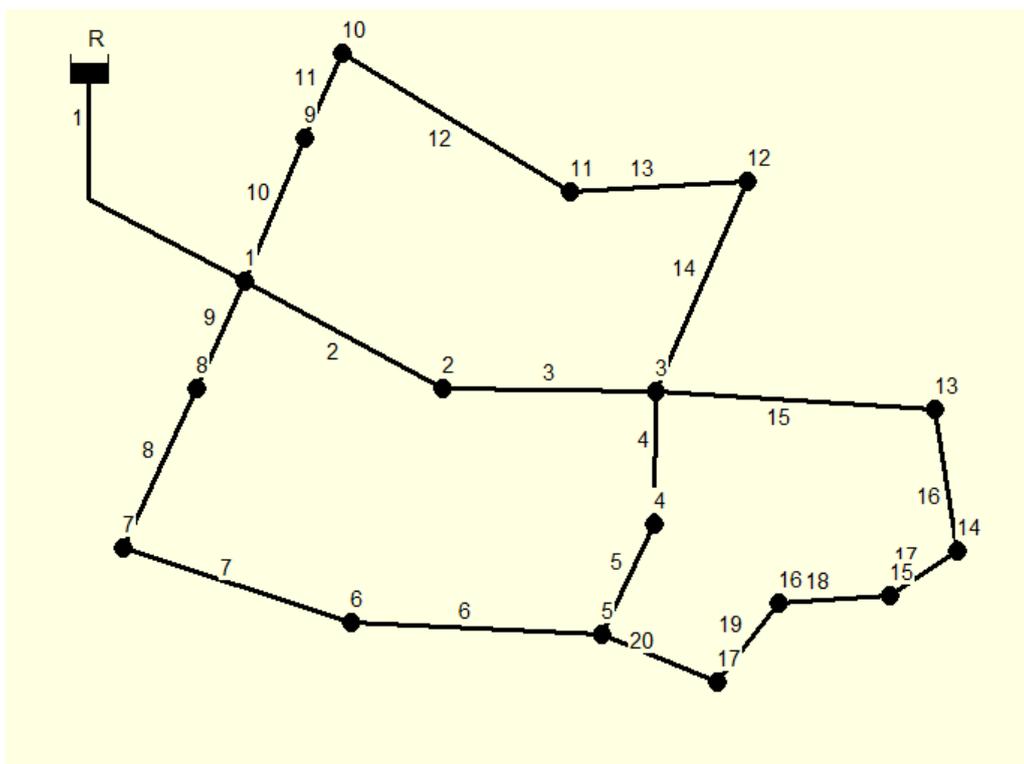


Figura01 – Traçado da Rede Itororó

Inicialmente, a partir da disposição de alguns dados de projeto mencionados por Dacach (1975), procedeu-se com o dimensionamento econômico da rede pelo módulo LENHSNET do software de modelagem hidráulica EPANET (Gomes, 2009) para um horizonte de projeto de 20 anos, com o emprego de tubulações de PVC. Nesse sentido, para o cenário do horizonte de projeto, cuidou-se para que a rugosidade fosse adaptada para essa situação, conforme a Tabela 01. Os dados de projeto relativos às demandas de água nos nós e suas cotas topográficas estão mostrados na Tabela 02, enquanto na Tabela 03 se encontram os comprimentos dos trechos, seus coeficientes de rugosidade, para o horizonte de projeto de 20 anos, e os valores dos diâmetros obtidos com o dimensionamento da rede.

Tabela 01 – Valores do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams em função da idade das tubulações

<i>TUBO</i>	<i>NOVOS</i>	<i>USADOS</i>	<i>USADOS</i>
		<i>(aproximadamente 10 anos)</i>	<i>(aproximadamente 20 anos)</i>
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Gomes (2009a)

Tabela 02 – Dados dos nós para o cenário de projeto da rede Itororó

<i>Identificador do Nó</i>	<i>Cota [m]</i>	<i>Consumo-Base [l/s]</i>
Nó 1	220,5	5,05
Nó 2	215,6	1,91
Nó 3	210,4	3,82
Nó 4	210,5	1,4
Nó 5	209,5	4,35
Nó 6	213,2	3,51
Nó 7	218,5	3,43
Nó 8	230,7	2,48
Nó 9	211,5	3,07
Nó 10	213,5	1,85
Nó 11	205,5	2,86
Nó 12	208,8	6,11
Nó 13	215,5	5,09
Nó 14	212,6	4,06
Nó 15	207,5	8,05
Nó 16	219,4	4,26
Nó 17	220,5	1,2
RNF R	248,0	-

Tabela 03 – Dados das tubulações para o cenário de projeto da rede Itororó

<i>Identificador do Trecho</i>	<i>Comprimento [m]</i>	<i>Diâmetro interno [mm]</i>	<i>Rugosidade</i>
Tubulação 1	324	299,8	130
Tubulação 2	124	156,4	130
Tubulação 3	184	156,4	130
Tubulação 4	206	108,4	130
Tubulação 5	103	156,4	130
Tubulação 6	202	108,4	130
Tubulação 7	134	108,4	130
Tubulação 8	227	108,4	130
Tubulação 9	167	156,4	130
Tubulação 10	166	108,4	130
Tubulação 11	152	108,4	130
Tubulação 12	168	108,4	130
Tubulação 13	177	108,4	130
Tubulação 14	225	108,4	130
Tubulação 15	254	108,4	130
Tubulação 16	263	108,4	130
Tubulação 17	133	108,4	130
Tubulação 18	321	108,4	130
Tubulação 19	105	108,4	130
Tubulação 20	169	108,4	130

Concluído o dimensionamento e a simulação hidráulica da rede para o cenário de projeto, buscou-se aplicar o I_{EE} sob a forma de 3 (três) situações distintas:

(a) na primeira, simulou-se a rede com todos os parâmetros previstos em projeto - crescimento demográfico médio anual de 1,18 % (Brasil) e rugosidades alteradas com o tempo de modo previsto pela bibliografia, com os dados da Tabela 01. No tocante ao supracitado crescimento demográfico médio anual, optou-se, por insuficiência prática de dados da cidade de Itororó (BA), que fossem suficientes para se gerar um modelo preditivo de regressão que fosse capaz de representar previsões futuras da população da cidade, por obter os dois últimos dados de população para o Brasil (dados pelos Censos 2010 e 2000, realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE) e se calcular a média anual de crescimento, conforme a tabela abaixo:

Tabela 04 – Modelo de crescimento demográfico utilizado para variar as demandas nodais na rede Itororó

POPULAÇÃO DO BRASIL EM 2010	190.755.799
POPULAÇÃO DO BRASIL EM 2000	169.590.693
CRESCIMENTO TOTAL NO PERÍODO	12,48%
CRESCIMENTO MÉDIO ANUAL NO PERÍODO	<u>1,18%</u>

Uma vez determinado o crescimento médio anual, adotou-se, nessa situação 1, um padrão de variabilidade das demandas nodais apenas em função do crescimento populacional verificado. Nesse sentido, chegou-se à seguinte tabela:

Tabela 05 – Fatores multiplicativos das demandas nodais para a rede Itororó

<i>ANO</i>	<i>TEMPO DE OPERAÇÃO(ANOS)</i>	<i>POPULAÇÃO</i>	<i>FATOR</i>
2010	0	19914	0,7909
2015	5	21117	0,8386
2020	10	22393	0,8893
2025	15	23745	0,9430
2030	20 (HP)	25180	1,0000
2035	25	26701	1,0604
2040	30	28314	1,1245

Nela, é possível observar que, com o intuito de aplicar o I_{EE} de forma satisfatória, considerou-se o ano 0 (ano do final da construção e início da operação da rede) como sendo o ano de 2010, último ano com dados oficiais (segundo o IBGE) de população para Itororó (BA). A partir desse ano, concebeu-se uma variação de 5 em 5 anos para a operação da rede. Em cada um desses cenários, a população foi calculada em função do crescimento médio anual de 1,18%, mencionado anteriormente, seguindo um modelo geométrico e gerando, dessa forma, um fator multiplicativo (última coluna) que representa a relação entre a populacional da cidade no ano em análise e a população no horizonte de projeto (HP) - neste caso 20 anos. Foram utilizados esses fatores para cada um dos cenários obtidos da variação demográfica de 5 em 5 anos; foram geradas simulações da rede no EPANET e calculadas as perdas de carga em cada um dos 20 trechos da rede. Para cada um desses cenários foram calculados o índice de energia dissipada na rede (i_{ED}) e o indicador de eficiência energética da rede de distribuição (I_{EE}).

(b) a segunda situação consistiu basicamente em uma adaptação da primeira, na qual I_{EE} foi calculado para cada um dos sete cenários a partir apenas da variação das demandas nodais (que deveria ser prevista pelo projetista da rede no momento da concepção de seu projeto). Nessa nova situação, foi incorporado um aumento não previsto em projeto para as demandas, buscando-se modelar, por exemplo, um processo de verticalização intensa no uso do solo urbano para a localidade. Para tal, supôs-se um crescimento demográfico médio anual de 1,4%, o que gerou um aumento nas demandas de 18,64% em relação ao crescimento médio anual de 1,18% da situação 1). As rugosidades das tubulações, entretanto, permaneceram as mesmas de projeto;

(c) a terceira e última situação concebida para a rede foi uma adaptação da segunda. Nessa nova situação, manteve-se o mesmo crescimento demográfico da situação 2, prevendo, porém, uma deterioração maior do que a prevista da rugosidade das tubulações. Para tal, diminuiu-se 5 unidades de C a cada 5 anos de idade da rede. Nesse sentido, os valores de C referentes às rugosidades começaram em 140 (no ano 0) e foram caindo, em cada cenário, até 110 (no ano 30). O intuito de aplicação do I_{EE} nessa situação foi justamente incorporar, além de um aumento não previsto inicialmente em projeto das demandas da rede (situação 2), um modelo mais significativo de deterioração da capacidade de transporte das tubulações (também não concebido em projeto), graças, por exemplo, a incrustações e tuberculizações que podem ocorrer com os tubos ao longo do tempo.

Todos os resultados no cálculo do i_{ED} e do I_{EE} , para cada um dos sete cenários de simulação do tempo de operação da rede, em cada uma das três situações acima explicitadas, encontram-se na próxima seção deste artigo. Também será possível fazer uma análise comparativa gráfica entre as três situações na subseção de discussão dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados da Situação 1

A partir do que já foi mencionado, tal situação remete ao cálculo do indicador para cada um dos sete cenários de simulação (do ano 0 ao ano 30, com variação de 5 em 5 anos) apenas com a variação das demandas nodais (construídas em função de um crescimento demográfico médio anual de 1,18%) e valores de rugosidades passíveis de serem previstos pelo projetista no ato de elaboração do projeto.

Apenas a título de exemplificação, consta na Tabela 06 os resultados da aplicação do indicador para o cenário referente ao horizonte de projeto considerado (ano 20). Todos os outros cenários (ano 0, ano 5, ano 10, até o ano 30 de operação da rede, de 5 em 5 anos) são análogos, com a diferença apenas, nesse caso, dos aspectos relacionados às demandas de vazão nos nós e às rugosidades das tubulações (conforme concebido em projeto).

Tabela 06 – Resultados da aplicação do IEE para a rede Itororó no cenário de horizonte de projeto (20 anos) da situação 1

Trecho	Nó Inicial (i)	Nó Final (f)	L (m)	D(mm)	Rug.	Q (L/s)	Perda de Carga	
							(m/km)	(m)
Tubulação 1	RNF	1	324,0	299,8	130	62,50	2,70	0,87
Tubulação 2	1	2	124,0	156,4	130	30,93	17,47	2,17
Tubulação 3	2	3	184,0	156,4	130	29,02	15,52	2,86
Tubulação 4	3	4	206,0	108,4	130	10,05	12,98	2,67
Tubulação 5	4	5	103,0	156,4	130	8,65	1,65	0,17
Tubulação 6	6	5	202,0	108,4	130	5,83	4,74	0,96
Tubulação 7	7	6	134,0	108,4	130	9,34	11,34	1,52
Tubulação 8	8	7	227,0	108,4	130	12,78	20,26	4,60
Tubulação 9	1	8	167,0	156,4	130	15,26	4,72	0,79
Tubulação 10	1	9	166,0	108,4	130	11,26	16,01	2,66
Tubulação 11	9	10	152,0	108,4	130	8,20	8,90	1,35
Tubulação 12	10	11	168,0	108,4	130	6,35	5,54	0,93
Tubulação 13	11	12	177,0	108,4	130	3,49	1,83	0,32
Tubulação 14	3	12	225,0	108,4	130	2,62	1,08	0,24
Tubulação 15	3	13	254,0	108,4	130	12,54	19,57	4,97
Tubulação 16	13	14	263,0	108,4	130	7,45	7,46	1,96
Tubulação 17	14	15	133,0	108,4	130	3,39	1,74	0,23
Tubulação 18	16	15	321,0	108,4	130	4,66	3,12	1,00
Tubulação 19	17	16	105,0	108,4	130	8,92	10,41	1,09
Tubulação 20	5	17	169,0	108,4	130	10,13	13,17	2,23
CÁLCULO DO INDICADOR:								
ÍNDICE/INDICADOR			VALORES					
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO (i_{ED})			0,00883 [m/m]		8,83 [m/km]			
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (I_{EE})			1,000		100,00 %			

Nela, é possível observar que existem colunas com a identificação dos seguintes conjuntos de informações:

- Trecho da rede, conforme o que foi explicitado pela Figura 01;
- Nó inicial, no âmbito de cada trecho da rede, conforme a mesma Figura 01;
- Nó final, no âmbito de cada trecho da rede, conforme a mesma Figura 01;

- L - Comprimento de cada trecho, em m;
- D – Diâmetro interno, em mm, de cada trecho;
- Rug. – Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, considerado para o cenário;
- Q – Vazão considerada que flui no trecho, em L/s, no cenário em consideração;
- Perdas de Carga – Colunas referentes à aplicação da fórmula de Hazen-Williams para a perda de carga em duas unidades: a primeira e a segunda referem-se às informações fornecidas pelo próprio EPANET (sendo a primeira na unidade m/km, e a segunda na unidade m).

Na Tabela 07 identifica-se a parte da planilha responsável pelo cálculo do indicador propriamente dito. Na primeira linha consta o valor do i_{ED} , calculado em função do somatório de perda de carga de todos os trechos, dividido pelo somatório de todos os comprimentos de tubulações. Já na segunda linha é apresentado o valor do indicador, calculado, nesse caso, aplicando-se a razão entre i_{ED} de projeto e o i_{ED} do cenário considerado (neste caso, o mesmo cenário. Por isso o valor 100%) correspondente ao cenário de projeto (ano 20).

A Tabela 7 apresenta, também, o resumo dos resultados de todos os cenários para a situação 1, que são plotados em um gráfico explicativo (Figura 02) do comportamento do I_{EE} . Na Figura 02, é possível observar a equação, obtida por regressão polinomial de segundo grau, que quantifica os valores do I_{EE} para qualquer outro cenário não estabelecido. Percebe-se, também, o grau de correlação entre as variáveis, verificado pelo alto valor do coeficiente R^2 (0,9966).

Tabela 07 – Resultados da aplicação do I_{EE} para a rede Itororó na situação 1

ÍNDICE/INDICADOR	ANO 0	ANO 05	ANO 10	ANO 15	ANO 20 (HP)	ANO 25	ANO 30
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - i_{ED} [m/km]	4,99	5,55	6,63	7,38	8,83	9,85	11,80
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA REDE - I_{EE}	177,05%	159,06%	133,23%	119,60%	100,00%	89,70%	74,86%

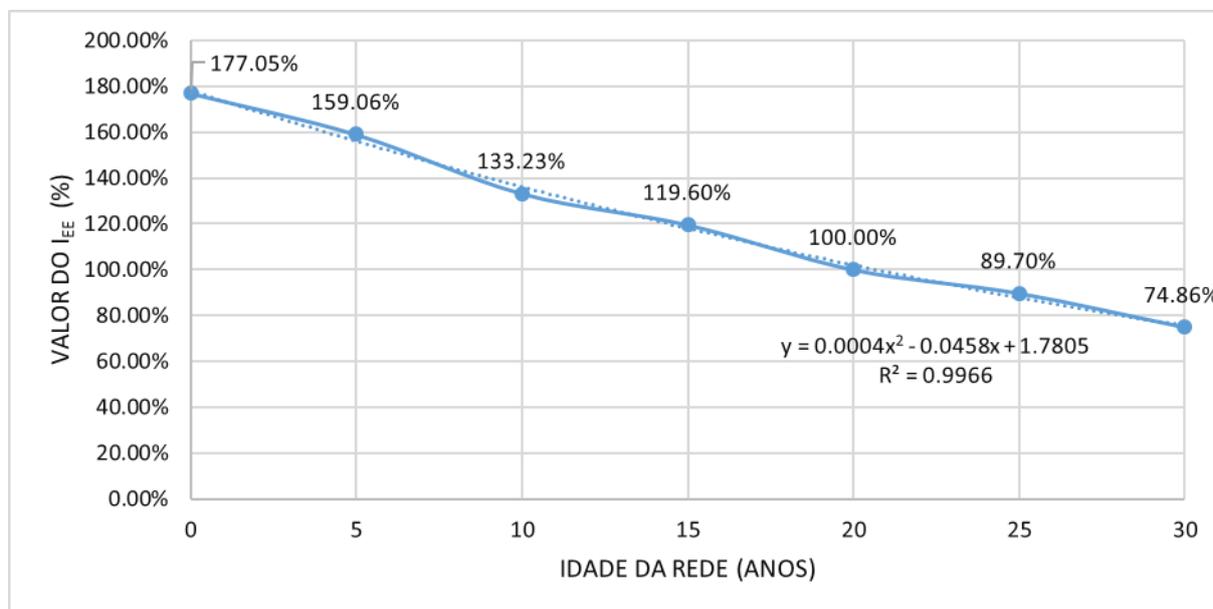


Figura 02 – Comportamento do I_{EE} na rede Itororó na situação 1

Resultados da Situação 2

A situação 2 da rede Itororó, como já mencionado, é análoga à situação 1, mas com um incremento maior das demandas nodais, não previstas no projeto original. Nesse caso, ao invés do crescimento demográfico médio anual de 1,18%, optou-se por utilizar 1,4%, o que acabou por gerar uma ampliação de 18,64% dos consumos-base dos nós.

Obedecendo o mesmo esquema da situação 1, na Tabela 07 são mostrados os resultados da aplicação do indicador para o cenário referente ao horizonte de projeto considerado (ano 20).

Tabela 08 – Resultados da aplicação do I_{EE} para a rede Itororó no cenário de horizonte de projeto (20 anos) da situação 2

Trecho	Nó Inicial (i)	Nó Final (f)	L (m)	D(mm)	Rug.	Q (L/s)	Perda de Carga	
							(m/km)	(m)
Tubulação 1	RNF	1	324,0	299,8	130	74,13	3,70	1,20
Tubulação 2	1	2	124,0	156,4	130	36,70	23,96	2,97
Tubulação 3	2	3	184,0	156,4	130	34,43	21,29	3,92
Tubulação 4	3	4	206,0	108,4	130	11,90	17,77	3,66
Tubulação 5	4	5	103,0	156,4	130	10,24	2,26	0,23
Tubulação 6	6	5	202,0	108,4	130	6,92	6,51	1,32
Tubulação 7	7	6	134,0	108,4	130	11,08	15,55	2,08
Tubulação 8	8	7	227,0	108,4	130	15,15	27,77	6,30
Tubulação 9	1	8	167,0	156,4	130	18,09	6,47	1,08
Tubulação 10	1	9	166,0	108,4	130	13,35	21,98	3,65
Tubulação 11	9	10	152,0	108,4	130	9,71	12,19	1,85
Tubulação 12	10	11	168,0	108,4	130	7,52	7,60	1,28
Tubulação 13	11	12	177,0	108,4	130	4,13	2,51	0,44
Tubulação 14	3	12	225,0	108,4	130	3,12	1,48	0,33
Tubulação 15	3	13	254,0	108,4	130	14,88	26,84	6,82
Tubulação 16	13	14	263,0	108,4	130	8,84	10,23	2,69
Tubulação 17	14	15	133,0	108,4	130	4,02	2,37	0,32
Tubulação 18	16	15	321,0	108,4	130	5,53	4,30	1,38
Tubulação 19	17	16	105,0	108,4	130	10,58	14,29	1,50
Tubulação 20	5	17	169,0	108,4	130	12,00	18,04	3,05

CÁLCULO DO INDICADOR:

ÍNDICE/INDICADOR	VALORES	
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO (i _{ED})	0,01211 [m/m]	12,11 [m/km]
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (I _{EE})	0,7292	72,92 %

Como já era de se esperar, nessa situação 2 o I_{EE} caiu em relação ao I_{EE} tipicamente de projeto (situação 1) no cenário análogo, uma vez que foram consideradas maiores demandas nodais (que geraram maiores vazões nas tubulações que, por sua vez, geraram maiores de perda de carga hidráulica).

Na Tabela 09 consta o resumo dos resultados da aplicação do I_{EE} em cada um dos sete cenários, enquanto que a Figura 03 apresenta o gráfico explicativo do modelo de comportamento do indicador.

Tabela 09 - Resultados da aplicação do I_{EE} para a rede Itororó na situação 2

ÍNDICE/INDICADOR	ANO 0	ANO 05	ANO 10	ANO 15	ANO 20 (HP)	ANO 25	ANO 30
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - I _{ED} [m/km]	6,85	7,62	9,09	10,12	12,11	13,51	16,19
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA REDE - I _{EE}	128,94%	115,85%	97,15%	87,23%	72,92%	65,37%	54,54%

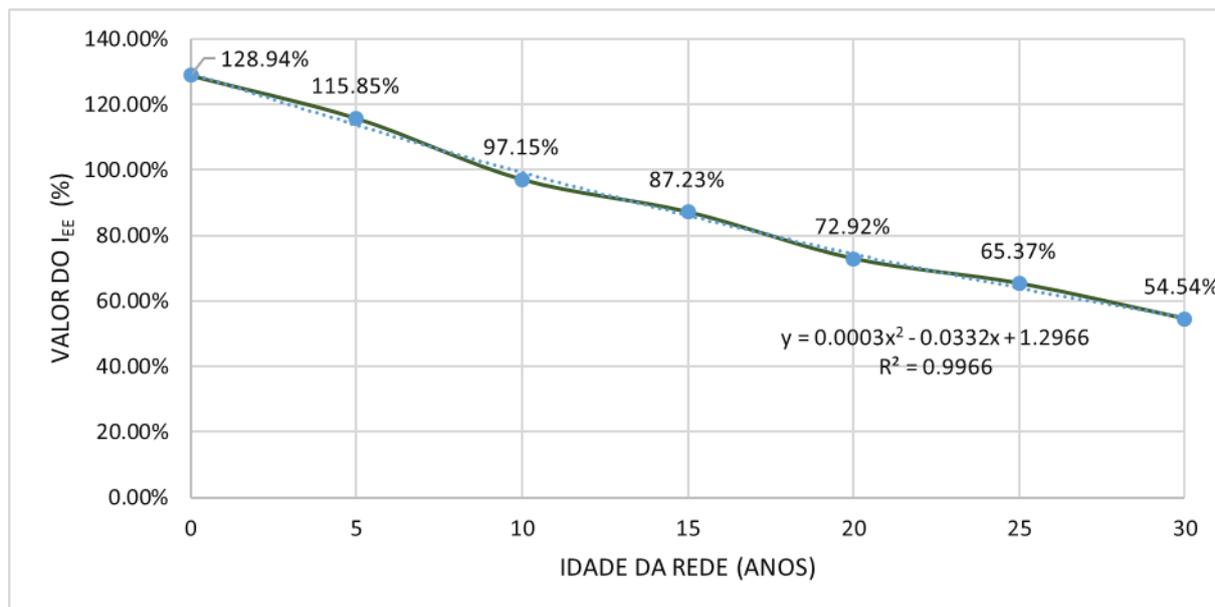


Figura 03 – Comportamento do I_{EE} na rede Itororó na situação 2

Resultados da Situação 3

Já a situação 3 da rede Itororó, como já explicado, é análoga à situação 2 (incluindo a mesma variação demográfica e de demandas nodais), mas com um incremento ainda maior das rugosidades das tubulações. Esse aumento de rugosidade pode ser decorrente de uma maior deterioração das paredes internas das tubulações e/ou com a presença de peças hidráulicas de controle parcialmente abertas. Nesse contexto, decrementou-se, adicionalmente à variação normal concebida em projeto, 5 unidades do coeficiente C a cada 5 anos do tempo de operação da rede, perfazendo dessa forma uma variação do valor de 140 (no ano 0) até 110 (no ano 30).

Nos mesmos moldes das situações 1 e 2, é apresentada na Tabela 10 os resultados da aplicação do indicador para o cenário referente ao horizonte de projeto considerado (ano 20).

Tabela 10 – Resultados da aplicação do I_{EE} para a rede Itororó no cenário de horizonte de projeto (20 anos) da situação 3

Trecho	Nó Inicial (i)	Nó Final (f)	L (m)	D(mm)	Rug.	Q (L/s)	Perda de Carga	
							(m/km)	(m)
Tubulação 1	RNF	1	324,0	299,8	120	74,13	4,30	1,39
Tubulação 2	1	2	124,0	156,4	120	36,70	27,79	3,45
Tubulação 3	2	3	184,0	156,4	120	34,43	24,69	4,54
Tubulação 4	3	4	206,0	108,4	120	11,90	20,61	4,25
Tubulação 5	4	5	103,0	156,4	120	10,24	2,62	0,27
Tubulação 6	6	5	202,0	108,4	120	6,92	7,54	1,52
Tubulação 7	7	6	134,0	108,4	120	11,08	18,04	2,42
Tubulação 8	8	7	227,0	108,4	120	15,15	32,20	7,31
Tubulação 9	1	8	167,0	156,4	120	18,09	7,50	1,25
Tubulação 10	1	9	166,0	108,4	120	13,35	25,49	4,23
Tubulação 11	9	10	152,0	108,4	120	9,71	14,14	2,15
Tubulação 12	10	11	168,0	108,4	120	7,52	8,81	1,48
Tubulação 13	11	12	177,0	108,4	120	4,13	2,91	0,52
Tubulação 14	3	12	225,0	108,4	120	3,12	1,72	0,39
Tubulação 15	3	13	254,0	108,4	120	14,88	31,13	7,91
Tubulação 16	13	14	263,0	108,4	120	8,84	11,86	3,12
Tubulação 17	14	15	133,0	108,4	120	4,02	2,75	0,37
Tubulação 18	16	15	321,0	108,4	120	5,53	4,99	1,60
Tubulação 19	17	16	105,0	108,4	120	10,58	16,58	1,74
Tubulação 20	5	17	169,0	108,4	120	12,00	20,93	3,54

CÁLCULO DO INDICADOR:

ÍNDICE/INDICADOR	VALORES	
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO (i _{ED})	0,01405 [m/m]	14,05 [m/km]
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (I _{EE})	0,6288	62,88%

Como também já era previsível, nesta situação 3 o I_{EE} caiu ainda mais em relação ao I_{EE} relativo ao projeto, na situação 1, bem como ao I_{EE} desse mesmo cenário na situação 2, visto que foram consideradas maiores níveis de decréscimo nos coeficientes de rugosidade.

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados da aplicação do I_{EE} em cada um dos sete cenários da situação 3, cujos resultados são plotados no gráfico da Figura 04.

Tabela 11 - Resultados da aplicação do I_{EE} para a rede Itororó na situação 3

ÍNDICE/INDICADOR	ANO 0	ANO 05	ANO 10	ANO 15	ANO 20 (HP)	ANO 25	ANO 30
ÍNDICE DE ENERGIA DISSIPADA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - i _{ED} [m/km]	6,85	8,16	9,75	11,68	14,05	16,96	20,52
INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA REDE - I _{EE}	128,94%	108,30%	90,58%	75,64%	62,88%	52,09%	43,05%

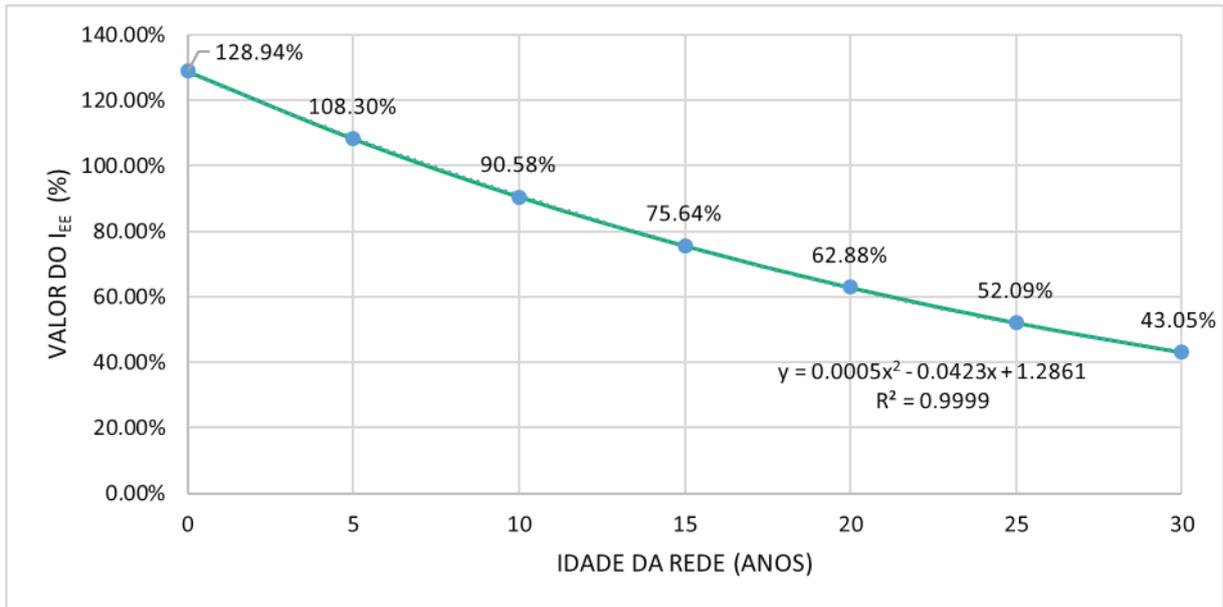


Figura 04 – Comportamento do I_{EE} na rede Itororó na situação 3

Discussões acerca dos resultados obtidos na aplicação do I_{EE} na rede Itororó

A partir dos resultados apresentados na seção anterior o gráfico da Figura 05 mostra as curvas referentes a cada uma das três situações concebidas para o cálculo do I_{EE}, em cada um dos sete cenários de simulação:

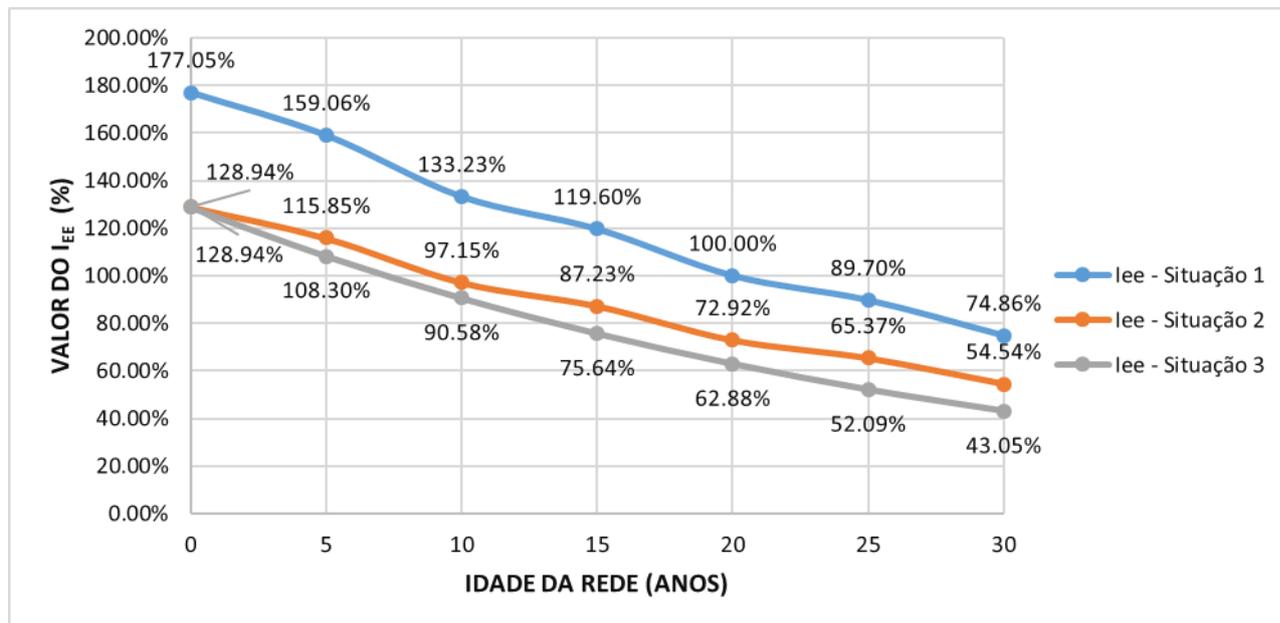


Figura 05 – Análise gráfica comparativa entre as três situações de aplicação do IEE para a rede de Itororó

Como pode ser percebido, há, como era de se prever, variações importantes nos valores do I_{EE} em função das situações analisadas. Tais valores são os maiores na situação 1, tanto em termos absolutos quanto relativos, uma vez que são as condições mais favoráveis de simulação (menor crescimento demográfico médio anual, denotando assim menores demandas nodais, e menores valores de rugosidade nas tubulações em relação às outras situações). Já na situação 2 é possível perceber uma queda nos níveis do I_{EE} em virtude da imposição de fatores mais desfavoráveis na operação da rede e na sua capacidade de transportar água, tais como maiores demandas nodais, em virtude da incorporação de um nível maior de crescimento demográfico em relação ao que se foi previsto inicialmente em projeto. Por fim, a situação 3 é aquela mais severa em termos de eficiência hidráulica e energética da rede de distribuição de água, sendo reproduzida tal ineficiência nos valores mais baixos de I_{EE} em relação às outras duas situações de modelagens hidráulicas. Isso acontece graças ao fato de que, além da adição de demandas maiores do que as previstas em projeto incorporou-se, também, um processo ainda mais acelerado da diminuição da capacidade de transporte de água pelas tubulações, refletido no aumento da rugosidade com o passar do tempo.

Em face do exposto, percebe-se que os resultados no tocante à rede de Itororó são bastante coerentes. Nesse âmbito, fica ratificado o potencial do I_{EE} de fornecer subsídios para a quantificação da capacidade de transporte de água de uma determinada rede de tubulações pressurizadas. A metodologia desenvolvida neste trabalho permite informar aos gestores de sistemas de abastecimento sobre muitos aspectos importantes no tocante ao desempenho desses sistemas. Como exemplo principal, cita-se a perda da capacidade de transporte de água da rede, seja a partir do surgimento de demandas maiores que as previstas no projeto da rede, seja em função da deterioração da rugosidade das tubulações.

CONCLUSÕES

Todas as redes potencialmente passíveis de serem analisadas por meio da metodologia proposta por essa pesquisa podem apresentar diferentes características físicas e topográficas, bem como distintas demandas de água. Nesse sentido, o indicador de eficiência energética (I_{EE}) quantifica, para cada uma delas, a relação entre a energia dissipada por perda de carga no cenário de referência (aquele previsto no projeto da rede, por exemplo) e um cenário qualquer de avaliação dessa mesma rede, onde o último é calculado dentro dos limites operacionais da rede em um determinado tempo específico, considerando a variação da demanda e/ou

mudança da rugosidade dos tubos. Uma vez que o indicador é expresso em valores percentuais, torna-se possível comparar diretamente o valor obtido nas análises no âmbito de cada rede em consideração.

Como foi possível observar pelos resultados gráficos sobrepostos da Figura 05, pode-concluir que, na situação 1, a rede Itororó só se tornou ineficiente, em termos de sua capacidade de transporte da água depois do horizonte de projeto concebido (20 anos), como é previsível. Nas situações 2 e 3, como são mais desfavoráveis as condições de operação da rede, ela se torna ineficiente antes desse tempo. O I_{EE} de ambas passa a ser inferior a 100% entre os anos 5 e 10, sendo que na situação 3 esse patamar é atingido, aproximadamente, 2 anos antes da situação 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEGRE, H., HIRNER, W., BAPTISTA, J. M., PARENA, R. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Lisboa: Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.
2. AZEVEDO NETTO et al. Manual de hidráulica. 8º Ed. São Paulo, Editora Blucher, 1998.
3. DACACH, N. Sistemas urbanos de água. Ao Livro Técnico e Científico, Rio de Janeiro, 1975.
4. a - GOMES, H. P. Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.
5. b - _____. Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2009.
6. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/>. Acesso em: 28 de mar. 2017.
7. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo 2010. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 de mar. 2017.
8. MARANHÃO, N. Sistema de indicadores para planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas. Tese de doutorado, PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
9. NUDURUPATI, S. S.; BITITCI, U. S.; KUMAR, V.; CHAN, F. T. S. State of the art literature review on performance measurement. Computers & Industrial Engineering. Los Angeles, v. 1, n. 60, p. 279-290, 2011.
10. VILANOVA, M. R. N. Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões. 2012. 319 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2012.
11. VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Modeling of hydraulic and energy efficiency indicators for water supply systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Golden, v. 1, n. 48, p. 540-557, 2015.
12. VILANOVA, M. R. N.; MAGALHÃES FILHO, P.; BALESTIERI, J. A. P. Performance measurement and indicators for water supply management: review and international cases. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Golden, v. 1, n. 43, p. 1-12, 2015.