

## **ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA USINA NUCLEAR COM REATOR BWR E ESTUDO COMPARATIVO COM A USINA NUCLEAR ANGRA 2 DO MODELO PWR**

Filipe de Almeida da Silva Soares<sup>1</sup>  
Jonni Guillier Ferreira Madeira<sup>1</sup>  
Manuel Luis Pires Clara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEFET/RJ - Campus Angra dos Reis

<sup>2</sup>ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.422>

### **RESUMO**

Uma usina nuclear gera energia elétrica por meio de reações nucleares que ocorrem controladamente em um reator. Este tipo de termoeletrônica vem se destacando como uma importante fonte de energia elétrica, principalmente a elevados fatores de capacidade, domínio da tecnologia e emissão de pequenas quantidades de gases que influenciam no efeito estufa. Os reatores de água fervente (Boiling Water Reactor - BWR) representam 18% do total de reatores nucleares existentes do mundo, ficando apenas atrás dos reatores de água pressurizada (Pressurized Water Reactor - PWR). Neste trabalho é apresentado um estudo investigativo, no qual foi realizada uma análise energética sobre a central nuclear de LaSalle e seus equipamentos. Foi feita, também, uma comparação com os dados encontrados por Siqueira (2016), que realizou um estudo da usina nuclear de Angra 2 do tipo PWR. A usina nuclear analisada é do tipo BWR, com capacidade de geração de 1144 MW. A eficiência encontrada do ciclo da planta foi de 34,6%, valor ligeiramente superior ao resultado encontrado num PWR. No entanto, esta diferença se torna significativa quando tem-se que essas centrais funcionam com capacidade superior à 1000MW.

Palavras-chave: Energia Nuclear, Reator BWR, Reator PWR, Análise Energética, Energia.

## ABSTRACT

A nuclear power plant generates electricity through nuclear reactions that occur in a controlled reactor. This type of thermoelectric has been standing out as an important source of electric energy due mainly to high capacity factors, dominance of the technology and emit small volumes of gases that influence the greenhouse effect. Boiling water reactors (BWRs) account for 18% of the world's existing nuclear reactors, behind only the pressurized water reactors (PWRs). This work presents an investigative study where an energy analysis was performed on the LaSalle nuclear power plant and its equipment. In addition to a brief comparison with the data found by Siqueira (2016) who carried out a study of the Angra 2 nuclear power plant of the PWR type. The nuclear power plant analysis is of type BWR, with a generating capacity of 1144 MW. The efficiency found in the plant cycle was 34.6%, slightly higher than the result found in a PWR. However, this difference becomes significant since it is known that these plans operate with capacity greater than 1000MW.

Keywords: Nuclear Energy, BWR Reactor, PWR Reactor, Energy Analysis, Energy.

## 1. INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna atual é indispensável dispor de energia para satisfazer todas as necessidades existentes. Com o consumo energético crescendo cada vez mais faz-se necessário o aumento da oferta de energia, em especial da elétrica, de forma confiável e com o preço adequado. O suprimento e a segurança energética são de extrema importância para qualquer país e, devido a isto, os governos de forma geral vêm estudando as tecnologias e a energia nuclear vem se destacando com uma importante fonte de energia elétrica (ELETRONUCLEAR, 2016).

Uma usina nuclear gera energia elétrica por meio de reações nucleares que ocorrem controladamente em um reator. O calor gerado pela reação nuclear é o responsável pela transformação da água em vapor e este, por sua vez, aciona uma turbina a vapor que é ligada a um gerador e, dessa forma, é produzida a eletricidade (ELETRONUCLEAR, 2017a).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês), o setor de produção de eletricidade emite no mundo 10 gigas toneladas de  $CO_2$  para atmosfera. Isso representa a maior parcela da emissão global com aproximadamente 37%. No relatório de comparação das emissões de gases do efeito estufa realizado pela World Nuclear Association, a energia nuclear se

destaca, podendo ser considerada como uma fonte limpa de produção de eletricidade. Neste relatório, a energia nuclear apresenta os menores valores médios de emissão de dióxido de carbono por GWh produzido dentre as fontes não renováveis. Estes valores são semelhantes aos encontrados em fontes renováveis de energia como a hidráulica e a eólica. No caso da energia nuclear, as emissões estão em sua maior parte na construção e desmantelamento (WNA, 2011).

A energia nuclear, presente em vários países, vem se tornando uma das principais fontes de energia devido a fatores como: eletricidade em abundância a partir de pequenas quantidades de material base, já que 1 kg de urânio libera aproximadamente a mesma quantidade de energia que 16 mil toneladas de um combustível fóssil (GOLDEMBERG, 2011); as usinas nucleares requerem uma menor área de instalação quando comparadas às usinas hidroelétricas, por exemplo; emitem pequenas quantidades de gases que influenciam no efeito estufa; produção de energia elétrica independe das condições climáticas; possibilitam também uma maior independência energética para alguns países que dependem do petróleo e gás estrangeiro; elevados fatores de capacidade e domínio da tecnologia (PERRUZO, 2012; SIQUEIRA, 2016).

Apesar destas vantagens ainda existe muita desconfiança, principalmente da população, em relação a segurança e os riscos que se têm na produção de energia elétrica por meio das usinas nucleares. Casos de acidentes nucleares mais recentes como o de Fukushima (2011) e, até mesmo, mais antigos como o de Chernobyl (1986) e o de Three Mile Island (1979) são assuntos de bastante discussão e polêmica (PERRUZO, 2012).

Mesmo com a existente desconfiança, a produção de energia nuclear apresentou um crescimento mundial considerável dentre os anos de 1974 e 2014. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, da sigla em inglês) a participação da energia nuclear na matriz energética mundial passou de 0.9% para 4,8%, do ano de 1974 para o ano de 2014. Especificamente para produção de eletricidade, no ano de 2014, ela representou 10.7% a nível mundial. Tal dado mostra que a geração de eletricidade, a partir da energia nuclear, é bastante expressiva no cenário mundial. Com dados de 2014, a tabela seguinte mostra que países como França, Ucrânia, Suíça, Coreia, Estados Unidos, Reino Unido, entre outros, têm sua energia elétrica altamente dependente da energia nuclear. Por outro lado, pode-se dizer que atualmente a energia nuclear vive um cenário de incerteza. Enquanto países como a China estão investindo e expandindo o uso da energia nuclear para geração de energia, a Alemanha está buscando diminuir a oferta nuclear em sua matriz energética. Enquanto países como a França mantêm constante o uso e investimento na energia nuclear, outros

não cogitam a possibilidade de instalação.

Os reatores presentes nas usinas nucleares convertem a energia gerada na fissão do urânio, que é o material físsil mais utilizado atualmente, para produção de energia elétrica. Quanto às estruturas e formas de trabalho, estes reatores podem ser de diversos tipos (WNA, 2017a). Os reatores de água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor) e os reatores de água fervente (BWR – Boiling Water Reactor) são considerados os principais tipos e representam cerca de 64% e 18%, respectivamente, do total de reatores existentes no mundo (IAEA, 2016). Os outros tipos equivalem a tecnologias que estão se tornando obsoletas e sumirão da matriz nuclear mundial na medida em que as usinas chegarem ao fim de suas vidas úteis (ELETRONUCLEAR, 2017b).

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Reatores BWR

Os reatores de água fervente (BWR) têm origem na década de 1950 e fizeram uso da tecnologia desenvolvida pela GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) no plano de submarino nuclear projetado para marinha dos Estados Unidos. O primeiro reator deste tipo, construído na Califórnia em 1957, com geração de 5 MWe, confirmou a possibilidade de geração de eletricidade com sucesso e segurança (SCHREIBER, 2009). Os BWRs são adotados em países como os Estados Unidos, Japão, Alemanha, Finlândia, Rússia, Suíça e Suécia (IAEA, 2016).

O BWR foi desenvolvido tendo como base o reator de água pressurizada (PWR), com o objetivo de simplificar o projeto e aumentar a eficiência térmica. A maior diferença entre os dois é que o BWR trabalha com um único circuito a pressão e temperatura mais baixas (WNA, 2017b; CLP, 2017). O calor gerado pela fissão do átomo de urânio faz a água de refrigeração ferver no núcleo do reator até se transformar em vapor. O vapor gerado alimenta diretamente as turbinas onde será gerada a energia elétrica. Ao contrário do que ocorre no BWR, em um PWR, a água aquecida no núcleo do reator não entra em seu estado de vapor por estar sob pressão elevada. Em seguida, esta água quente troca calor com uma água sob baixa pressão, que entra no estado de vapor e, assim, é encaminhado para as turbinas. (PERRUZO, 2012; BRENNEN, 2005; SCHNEIDER, et al., 2015).

A simplificação do projeto para um único circuito é vantajosa para a eficiência térmica, porém, a água ao redor do núcleo do reator contém sempre traços de radionuclídeos e isto significa que a turbina deve

ser bem protegida a fim de se evitar a liberação do vapor com produto radioativo ao meio externo (WNA, 2017b). Segundo Perruzo (2012), o sistema de resfriamento de emergência é bem mais complexo do que nos PWRs, já que as injeções de hastes de controle vêm da parte de baixo do vaso de pressão. Para um caso de desligamento de emergência, seria necessária energia para fazer com que estes absorvedores de nêutrons sejam introduzidos no núcleo. Essa energia não é necessária nos PWRs, já que as barras de controle são posicionadas para cair por gravidade. A grande vantagem dos reatores de água fervente, quando comparados os de água pressurizada, está na eficiência energética do ciclo. A melhor eficiência se deve, principalmente, por não ter o gerador de vapor e as perdas associadas a este componente (GEH, 2010; RAGHEB, 2017).

## 2.2 Estudos energéticos

O estudo energético é uma importante ferramenta para o processo de aumento da eficiência global de geração de energia elétrica das plantas, nas quais são analisados os equipamentos e a planta como um todo. Os estudos energéticos em centrais nucleares são realizados desde a década de 80, com aplicação nas mais diversas plantas e tipos de reatores. Nas bibliografias analisadas as plantas nucleares apresentaram eficiência do ciclo entre 30 a 36% (SIQUEIRA, 2016; ROSEN, SCOTT, 1986; DURMAYAZ, YAVUZ, 2001).

Rosen e Scott (1986) realizaram um estudo energético e exerético de uma central nuclear que apresenta um reator do tipo CANDU. Este tipo de reator é formado por um conjunto tubo gerador composto por turbinas de alta e baixa pressão com sistema de reaquecimento, além de um conjunto de condensador e aquecedores de baixa e alta pressão. Os resultados encontrados sobre a análise energética mostram uma eficiência do ciclo de 30%.

Durmayaz e Yavuz (2001) realizaram uma análise energética e exerética em uma usina nuclear com reator PWR, de potência térmica de 4250 MW com geração de 1500 MWe. Os resultados encontrados sobre a análise energética mostram uma eficiência do ciclo de 36%. As eficiências energéticas das turbinas de alta e baixa pressão são estimados neste estudo em 91.48% e 87.99%, respectivamente. As bombas de alimentação de água e do condensador apresentaram uma eficiência de 90.59% e 78.60%, respectivamente.

Siqueira (2016), em seu estudo, apresentou a análise energética e exerética da usina nuclear de Angra 2 localizada na latitude 22°00' 25.0" S e longitude 44°27' 31.1" W, que opera com reator PWR,

rendimentos do ciclo e dos componentes que constituem o sistema. Os resultados encontrados pela autora sobre a eficiência energética da central são apresentados abaixo.

Tabela 1 - Eficiência energética dos equipamentos de Angra 2

Equipamento	Eficiência Energética
Gerador de Vapor	99.9%
Turbina de Alta Pressão (TAP)	99.8%
Reaquecedor	99.9%
Turbina de Baixa Pressão (TBP)	79.8%
Condensador	100%
Bomba do Condensador (BB)	89.9%
1º Aquecedor de Baixa Pressão (AB1)	100%
2º Aquecedor de Baixa Pressão (AB2)	99.6%
3º Aquecedor de Baixa Pressão (AB3)	99%
4º Aquecedor de Baixa Pressão (AB4)	99.8%
5º Aquecedor de Baixa Pressão (AB5)	99.9%
6º Aquecedor de Baixa Pressão (AB6)	100%
Desaerador	100%
Bomba de Alta Pressão (BA)	87.5%
1º Aquecedor de Alta Pressão (AA1)	99.8%
2º Aquecedor de Alta Pressão (AA1)	99.5%
3º Aquecedor de Alta Pressão (AA3)	94.6%
Ciclo	34.2%

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Análise energética

A análise da eficiência energética é um estudo termodinâmico que pode auxiliar na melhoria, nesse caso, da eficiência de uma usina nuclear com reator BWR. Esta melhoria é feita a partir de estudos investigativos sobre as características termodinâmicas e o desempenho da central como um todo, incluindo os equipamentos que a constituem. Se baseando na Primeira Lei da Termodinâmica (PLT), a análise energética é fundamentada no princípio da conservação de energia que nos diz que nenhuma energia é criada ou destruída, ela apenas pode

ser transformada de uma forma para outra, ou ser transferida entre sistemas (ÇENGEL; BOLES, 2013). A PLT correlaciona as variações de energia interna, potencial, cinética, térmica e trabalho no volume de controle. Considerando que as variações de energia potencial e energia cinética são desprezáveis em relação ao termo entalpia e em regime permanente, a PLT pode ser expressa pela Equação 1:

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{W}_{vc} + \sum_{i=e=1}^n (\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e) + \sum_{i=e=1}^n m g (z_i - z_e) + \sum_{i=e=1}^n m \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) = 0$$

onde;

$$\sum_{i=e=1}^n m g (z_i - z_e) \equiv 0 \quad e \quad \sum_{i=e=1}^n m \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \equiv 0$$

logo,

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{W}_{vc} + \sum_{i=e=1}^n (\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e) = 0 \quad (1)$$

Assim, temos que a taxa de transferência de calor menos a taxa de trabalho ou potência é igual a variação de energia interna no volume de controle.

A eficiência energética de um sistema pode ser dada como uma comparação entre o desempenho sob dadas circunstâncias reais e o desempenho que ela teria em um processo ideal (reversível). Em geral, esta eficiência energética também pode ser definida como a razão entre o produto energético obtido pela energia disponibilizada para obter este produto. Segundo Siqueira (2016), as centrais termoneucleares utilizam o ciclo de Rankine e sua eficiência pode ser calculada por meio da Equação 2:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} \quad (2)$$

onde,

$W_{ciclo}$  - Potência líquida total produzida no ciclo ( $W$ )

$$W_{ciclo} = Q_{in} - Q_{out}$$

$Q_{in}$  - Calor fornecido ao ciclo ( $W$ )

$$Q_{in} = h_{it} - h_{eb}$$

$Q_{out}$  - Calor retirado do ciclo ( $W$ )

$$Q_{out} = h_{et} - h_{ib}$$

Sendo:

$h_{it}$  - Entalpia específica na entrada da turbina (kJ/kg);

$h_{et}$  - Entalpia específica na saída da turbina (kJ/kg);

$h_{ib}$  - Entalpia específica na entrada da bomba (kJ/kg);

$h_{eb}$  - Entalpia específica na saída da bomba (kJ/kg) .

Neste trabalho considerou-se o condensador como um equipamento dissipativo, dessa forma, não foi calculada a eficiência do mesmo.

### 3.1.1 Bombas

A eficiência energética das bombas, segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, e em condições adiabáticas, pode ser expressa segundo a Equação 3:

$$\eta_b = \frac{\dot{W}_{ideal}}{\dot{W}_{real}} = \frac{\dot{m} (h_i - h_{es})}{\dot{m} (h_i - h_e)} \quad (3)$$



Sendo:

$h_i$  - Entalpia específica de entrada (kJ/kg);

$h_e$  - Entalpia específica de saída (kJ/kg);

$h_{es}$  - Entalpia isentrópica específica de saída (kJ/kg).

### 3.1.2 Turbinas

Nas turbinas, o cálculo da eficiência energética é feito comparando a potência real com a potência ideal nos equipamentos. Apresenta-se assim a Equação 4:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{ideal}} = \frac{\dot{m}(h_i - h_e)}{\dot{m}(h_i - h_{es})} \quad (4)$$

Sendo:

$h_i$  - Entalpia específica de entrada (kJ/kg);

$h_e$  - Entalpia específica de saída (kJ/kg);

$h_{es}$  - Entalpia isentrópica específica de saída (kJ/kg).

### 3.1.3 Trocador de calor

Pela Primeira Lei da Termodinâmica apresentada, a eficiência bruta dos trocadores de calor pode ser expressa pela Equação (5):

$$\eta = \frac{E_{Fluxo\ Aquecido}}{E_{Fluxo\ Aquecedor}} \quad (5)$$

### 3.2 Central nuclear de Lasalle

A central nuclear de LaSalle (LaSalle County Nuclear Generating Station) fica localizada na cidade Marseilles, Illinois. O funcionamento total começou no início da década de 80 e opera com duas unidades que, juntas, possuem capacidade de geração de 2320 MW, que abastecem cerca de 2,3 milhões de casas com energia elétrica. As duas unidades da central nuclear de LaSalle operam com reatores do tipo BWR, desenvolvidos pela General Electric e são operadas pela Exelon Generation.

O fluxo de água que entra no recipiente do reator como líquido comprimido, com uma pressão de 7308 kPa, é circulado no núcleo por meio de dois circuitos de recirculação. Em um destes circuitos existe uma etapa em que ocorre uma limpeza que desmineraliza a água e este fluxo de água volta a se misturar com a alimentação principal que vem da estação 1. Passando pelo reator, o líquido comprimido, transformado em vapor sobreaquecido, sai do recipiente do reator como vapor saturado de alta qualidade por meio da estação 8 com uma pressão de 6653 kPa. Este vapor será enviado para a turbina de alta pressão onde será expandido até atingir a pressão de 1138 kPa. O fluido então entra em um separador de umidade e flui com sentido às turbinas de baixa pressão. Atravessado por estes percursos a energia fornecida pelas turbinas já foi transferida para os geradores e o fluxo de vapor é condensado e direcionado aos aquecedores onde ocorrerá o reaquecimento para reiniciar o processo novamente. O diagrama esquemático de uma usina da central nuclear de LaSalle com reator BWR é representado na Figura 1 abaixo.

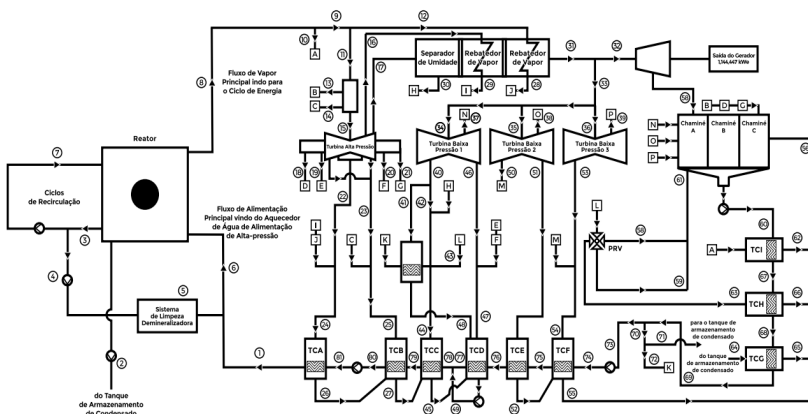


Figura 1 - Diagrama esquemático da estação nuclear LaSalle Country

Os dados termodinâmicos em cada ponto identificado no diagrama são apresentados na tabela abaixo. Os valores de entalpia e entropia foram definidos utilizando o programa SteamTable, do fornecedor Augsys Technologies Private Limited a partir dos estados e valores identificados no estudo de Dunbar, Moody e Lior (1995). A energia em megawatts de cada ponto foi definida utilizando o fluxo de massa ( $H_2O$ ) e a entalpia.

Tabela 2 - Dados termodinâmicos e energia da Usina de LaSalle

Nº Estação	Fluxo de Massa (kg/h)	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg-K)	Energia (MW)
1	6412584	7308	216	926,82	2,4715	1650,9100
8	6425971	6653	282	2776,97	5,8401	4956,8643
10	7031	6653	282	2776,97	5,8401	5,4236
15	6166982	6329	279	2780,85	5,8645	4763,7382
16	310270	4068	251	2800,56	6,0627	241,3694
17	5129398	1138	186	2783,06	6,5427	3965,3935
18	1322	1144	186	2782,59	6,5395	1,0218
19	1531	1144	186	2782,59	6,5395	1,1834
20	1531	1144	186	2782,59	6,5365	1,1834
21	1322	1144	186	2782,59	6,5395	1,0218
22	422745	2365	221	2801,33	6,2771	328,9576
23	298863	1144	186	2782,59	6,5395	231,0040
24	978491	2275	219	2800,76	6,2900	761,2538
25	304227	1103	184	2780,61	6,5525	234,9824
26	978513	2206	188	799,13	2,2152	217,2097
27	1282746	1069	163	688,86	1,9722	245,4536
30	684550	1124	185	784,05	2,1878	149,0892
31	4444961	1096	267	2977,36	6,9500	3676,1820
34	1562869	1082	267	2977,82	6,9566	1292,7636
35	1452809	1082	267	2977,82	6,9566	1201,7249
36	1349579	1082	267	2977,82	6,9566	1116,3358
37	1153014	7	39	2571,76	8,2746	823,6858
38	1153014	8	41	2575,33	8,2369	824,8305

Tabela 2 - Dados termodinâmicos e energia da Usina de LaSalle (continuação)

Nº Estação	Fluxo de Massa (kg/h)	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg-K)	Energia (MW)
39	1153014	9	43	2578,89	8,1999	825,9727
40	131747	648	214	2878,86	6,9927	105,3558
44	804712	620	160	2757,43	6,7491	616,3715
45	2087459	607	145	610,16	1,7907	353,7991
46	278109	393	164	2784,51	7,0121	215,1100
50	43795	63	87	2654,62	7,5170	32,2942
51	256001	117	105	2683,90	7,3114	190,8561
52	256001	110	72	301,46	0,9793	21,4372
53	196566	32	71	2627,92	7,7477	143,4890
54	240360	31	70	2626,14	7,7571	175,3386
55	496361	30	52	217,71	0,7296	30,0176
61	4060271	483	43	180,50	0,6121	203,5724
62	7031	28	52	217,71	0,7296	0,4252
63	3266	276	133	2726,18	7,0320	2,4735
64	4303	34	443	3368,99	9,1729	4,0269
65	4303	28	54	226,07	0,7552	0,2702
66	3266	28	52	217,71	0,7296	0,1975
67	4060271	448	44	184,64	0,6253	208,2496
68	4060271	414	45	188,79	0,6385	212,9282
69	4060271	379	46	192,94	0,6516	217,6060
73	4032551	345	46	192,91	0,6516	216,0872
74	4032511	1207	46	193,66	0,6512	216,9266
75	4032511	1172	67	281,3963	0,9176	315,2038
76	4032511	1138	101	424,0927	1,3175	475,0440
78	6412726	1103	139	585,3982	1,7281	1042,7773
79	6412726	1069	157	662,842	1,9121	1180,7289
80	6412726	1020	181	767,6071	2,1492	1367,3483
81	6412726	7584	182	775,3135	2,1499	1381,0758

O estudo da eficiência energética, a fim de aumentar a eficiência global na produção de energia elétrica, é realizado em uma determinada planta, analisando os pontos onde há mais perdas, para assim pensar nas melhorias. Estes estudos são aplicados a equipamentos, sistemas e, até mesmo, à planta de usinas nucleares. Os balanços energéticos referentes ao reator nuclear não serão apresentados nesse artigo, visto que envolve física nuclear, assunto não abordado.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela abaixo mostra a eficiência global do ciclo da usina analisada neste trabalho e de alguns importantes equipamentos presentes na planta. Os cálculos foram feitos a partir das equações apresentadas na metodologia.

Tabela 3 - Eficiência energética dos equipamentos de LaSalle

Equipamento	Eficiência Energética
Turbina de Alta Pressão	95%
Separador de Umidade	96.5%
Turbina de Baixa Pressão 1	88.5%
Turbina de Baixa Pressão 2	87.2%
Turbina de Baixa Pressão 3	86.8%
Bomba de Alta Pressão	95.6%
Bomba Condensador	99.1%
Aquecedor de Alta Pressão A	87.2%
Aquecedor de Alta Pressão B	98.74%
Aquecedor de Baixa pressão C	80.57%
Aquecedor de Baixa Pressão D	-
Aquecedor de Baixa Pressão E	98.11%
Aquecedor de Baixa Pressão F	83.45%
Aquecedor de Baixa Pressão G	100%*
Aquecedor de Baixa Pressão H	100%*
Aquecedor de Baixa Pressão I	99.85%
Ciclo	34.6%

Os resultados de eficiência energética encontrados para as bombas e turbinas na faixa dos 80-90% são semelhantes aos encontrados por Durmayaz e Yavuz (2001). O estudo de Siqueira (2016) apresentou valores bem próximos de 100% para as eficiências energéticas dos equipamentos, salvo alguns equipamentos como a turbina de baixa pressão, bombas de alta pressão e a bomba do condensador. Apesar de alguns equipamentos do presente estudo também apresentarem valores próximos de 100%, pode-se considerar que os resultados foram satisfatórios.

Especificamente para a eficiência energética do ciclo, o valor obtido de 34,6% se encontra na faixa do que se esperava alcançar e comprovou-se que as centrais nucleares com reatores de água fervente são mais eficientes que as que funcionam com reatores de água pressurizada, devido principalmente a simplificação da planta.

A análise a partir da Primeira Lei, sozinha, não pode ser usada para identificar áreas prospectivas para melhorar a eficiência da produção de energia elétrica. Ela é necessária, principalmente, para fins de contabilidade (para a modelagem tradicional e design de processos e plantas). A análise a partir da Segunda Lei serve para identificar as verdadeiras ineficiências da geração de energia que ocorrem em toda a central. Para uma melhor compreensão seria necessário realizar uma análise exergética.

## 5. CONCLUSÃO

A análise energética da planta da Central Nuclear de LaSalle mostrou uma eficiência energética do ciclo e dos equipamentos com valores semelhantes aos encontrados por Diana Siqueira (2016). O resultado mostra que esta central nuclear, assim como outras centrais que funcionam com reatores de água fervente, tem uma eficiência do ciclo próximo de 35%. As bibliografias estudadas mostraram que as usinas nucleares BWR apresentam uma maior eficiência, porém, neste projeto, verificou-se que as BWR são, em variação percentual, apenas 1% mais eficientes que as PWR. Os resultados se tornam satisfatórios quando temos que os dados obtidos para este projeto são de 1995 e, devido a isto, não passou pelas melhorias estruturais e operacionais que a usina nuclear de Angra 2 passou ao longo do tempo. Além de que estas centrais trabalham com geração de mais de 1000 MW; logo, esta diferença torna-se significativa.

Apesar da maior eficiência e menores custos, as usinas nucleares de água fervente não são as mais presentes do globo devido, principalmente, à segurança associada a esta. O desastre natural que

gerou problemas para as centrais de Fukushima no Japão, e suas consequências, fizeram com que ocorresse um estudo sobre as possíveis melhorias na planta a fim de se evitar acidentes futuros, elevando o custo deste tipo de reator. Há quem diga que os operadores da central nuclear de Fukushima teriam mais chances de controlar o acidente se fossem usinas nucleares com reatores PWR.

As usinas de energia nuclear que empregam o reator de água fervente para geração de vapor são, aproximadamente, 14-24% menos eficientes do que as centrais de combustíveis fósseis (DUNBAR, MOODY, LIOR, 1995). Sendo assim, esta análise energética, em conjunto com uma análise exergética, é de extrema importância para determinar pontos onde podem ocorrer ajustes/melhorias na planta, de modo que aumente a eficiência das usinas nucleares para níveis que se aproximam das centrais elétricas de combustíveis fósseis, tornando-as mais competitiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRENNEN, C. E. An Introduction to Nuclear Power Generation. Pasadena: Dankat Publishing Company, p. 177, 2005.

ÇENGEL, Y. A. e BOLES, M. A. Thermodynamics, An Engineering Approach. 5th Edition. Nova Iorque, p. 963, 2005.

CLPGroup. Commonly Used Nuclear Reactors. Disponível em: <[https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4\\_1\\_1.aspx](https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_1.aspx)>. Acesso em: 02 de maio de 2017.

DUNBAR, W. R.; MOODY, S. D. e LIOR, N. Exergy Analysis of an Operating Boiling Water Reactor Nuclear Power Station. Energy Conversion, v. 36, n. 3, p. 149-159, 1995.

DURMAYAZ, A. e YAVUZ, H. Exergy Analysis of a pressurized-water reactor nuclear-powerplant. Applied Energy, v. 69, p. 39-57, 2001

EIA. International Energy Outlook 2016. U.S. Department of Energy. Washington, p. 290, maio de 2016.

Eletronuclear. Panorama da Energia Nuclear no Mundo. Brasil, p. 207, edição de 2016.

Eletronuclear. Energia Nuclear: Como funciona uma usina nuclear? Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/SaibaMais/Espa%C3%A7oConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 29 de março de 2017a.

Eletronuclear. Esclarecimentos sobre as diferenças entre as usinas do tipo PWR, existentes no Brasil, e as BWR, de Fukushima Daiichi, no Japão. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Not%C3%ADcias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticialID=321>>. Acesso em: 15 de abril de 2017b.

GEH. Advantages of Boiling Water Reactors (BWR). GE Hitachi Nuclear Energy. Califórnia, p. 2, 2010.

GOLDEMBERG, J. O futuro da energia nuclear. REVISTA USP, São Paulo, n.91, p. 6-15, setembro/novembro 2011.

IAEA. Nuclear Power Reactors in the World. International Atomic Energy Agency. Series No2. Viena, p. 86, 2016.

IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency. Paris, p. 80, 2016.

PERUZZO, J. Fundamentos da ENERGIA NUCLEAR. Irani-SC, p.485, 2012.

RAGHEB, M. Nuclear Reactors Concepts and Thermodynamic Cycles. Capítulo 1, p.45, 2017.

ROSEN, M. A. e SCOTT, D. S. Energy and Exergy Analyses of a Nuclear Steam Power Plant. Canadian Nuclear Society. 7th Annual Conference, Toronto, Canadá, p. 187-196. 9-10 June 1986.

SCHNEIDER, M.; FROGGATT, A.; HAZEMANN, J.; KATSUTA, T.; ROMANA, M.V. e THOMAS, S. The World Nuclear industry - Status Report 2015. MYCLE SCHNEIDER CONSULTING PROJECT. Paris, London, p. 202. 2015.

SCHREIBER, R. Boiling Water Reactors BWRs. In: KOK, K. D. Nuclear Engineering Handbook. Boca Raton: Taylor & Francis Group. Cap. 3, p. 790, 2009.

SIQUEIRA, D. S. Análise Energética e Exergética de uma Usina Nuclear com Reator PWR. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 132p, 2016.

WNA. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. WNA Report. Londres, p. 12, julho de 2011.

WNA. Nuclear Power in the World Today. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>>. Acesso em: 02 de maio de 2017a.



WNA. Nuclear Power Reactors. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em 28 de abril de 2017b.