



**UNIFACS**

UNIVERSIDADE SALVADOR

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES\*

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM ENERGIA**

**MANASSES GUIMARÃES CARNEIRO**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDE DE TROCADORES DE CALOR: ANÁLISE  
TERMODINÂMICA E ELÉTRICA DO BOMBEAMENTO DE FLUIDO DE TROCA  
TÉRMICA**

Salvador  
2016

**MANASSES GUIMARÃES CARNEIRO**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDE DE TROCADORES DE CALOR: ANÁLISE  
TERMODINÂMICA E ELÉTRICA DO BOMBEAMENTO DE FLUIDO DE TROCA  
TÉRMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação,  
Mestrado em Energia da UNIFACS, Laureate  
International Universities, como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Freire da Silva.

Salvador  
2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

(Elaborada pelo sistema de Bibliotecas da UNIFACS, Laureate International Universities)

Carneiro, Manasses Guimarães

Eficiência energética em rede de trocadores de calor: análise termodinâmica e elétrica do bombeamento de fluido de troca térmica. / Manasses Guimarães Carneiro. – Salvador, 2016.

138 f.: il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Energia da UNIFACS, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Freire

1. Eficiência energética. I. Freire, Kleber, orient. II. Título.

CDD: 621.3

MANASSES GUIMARÃES CARNEIRO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS: ANÁLISE  
TERMODINÂMICA E ELÉTRICA DO BOMBEAMENTO DE FLUIDO DE TROCA  
TÉRMICA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia,  
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, à seguinte banca  
examinadora:

Kleber Freire da Silva – Orientador \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP, Brasil  
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo \_\_\_\_\_

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Brasil  
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities

Luiz Mário Nelson de Gois \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas  
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Salvador, 22 de dezembro de 2016.

A todos que acreditaram em mim, a minha esposa, a minha família, mãe, pai e irmão, ao meu orientador, TRANSPETRO, toda a banca e obviamente a Deus.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todos que acreditaram em mim, a minha esposa, a minha família, mãe, pai e irmão, ao meu orientador e toda a banca e obviamente a Deus.

Gostaria de agradecer também a TRANSPETRO especialmente ao seu corpo técnico que muito me ajudou para a obtenção dos dados necessários para elaboração desta dissertação, em especial cito, Ronaldo e Raimundo que me auxiliaram imensamente na instalação do analisador de qualidade energética me ajudando a superar todos os percalços encontrados na instalação; antes disso Eusam já havia me ajudado na identificação dos pontos e entendimento do diagrama unifilar e funcional da ligação elétrica, muito obrigado Eusam. Agradeço ainda na TRANSPETRO a Marco Aurélio que auxiliou na interface com o fornecedor do inversor e gentilmente cedeu a câmara térmica para medições de temperatura da água, sem isso a dissertação e os resultados obtidos não seriam possíveis. No GLP como não agradecer a Telles, Mateus e Valdeck que me ajudaram a simular as operações e obter o consumo energético das operações, a eles mais uma vez me desculpo pelo furo na linha de água. A Arianny que me apoiou nos cálculos químicos e entálpicos, sem ela e com meu entendimento até então intermediário em química os resultados não seriam possíveis. E por último agradeço a gestão do TEMADRE e GLP por terem permitido o estudo, Waldo, Alberto, Aline e Roberto, muito obrigado pelo apoio.

Na UNIFACS agradeço a Paulo Araújo, sempre me auxiliando no delineamento das ideias e percurso da dissertação, me ajudou muito a abrir a mente. Daniel pelo empréstimo e ajuda no entendimento elétrico do caso, agradeço também pelas críticas verbais que me deu; me ajudaram a evoluir, e, como não agradecer a Kléber, me fez entender questões elétricas vitais para as medições e para tomada de decisão além do que, não poderia deixar de prestar meu imenso agradecimento a meu orientador, não só porque é parte integrante dos resultados, mas porque sua boa avaliação é também necessária.

A família veio primeiro e teria que ser exaltada no final e sempre. Obrigado Tassia pela paciência nos momentos de estresse na frente do computador, TE AMO minha rainha. Obrigado a meu pai Dilson, mãe Reinalice e irmão Osias, por me tornarem o que sou hoje, tenho muito orgulho do homem que sou e sei que vocês me fizeram desta forma, muito obrigado.

*Só o desejo inquieto, que não passa,  
Faz o encanto da coisa desejada...  
E, terminamos desdenhando a caça,  
Pela doida aventura da caçada.*  
(Mário Quintana)

## RESUMO

O custo com energia elétrica no Brasil teve um aumento considerável no biênio 2015-2016, em grande parte, fruto da crise hídrica que se iniciou em 2012. Associado a este fato a economia do país passa por forte recessão e apresentou encolhimento de 3,8% em 2015 com perspectiva de 3,3% em 2016. Isto desencadeou uma forte redução da atividade industrial do país, aumento do desemprego e redução do consumo. Em virtude disso, processos mais eficientes vêm sendo buscados com o intuito de reduzir as despesas fixas e assim aumentar o lucro líquido dos setores produtivos. Na indústria, o consumo energético de motores elétricos corresponde a aproximadamente 68% do total, este setor por sua vez, consome 32,5% de toda a energia elétrica utilizada no país; é natural que motores elétricos sejam a prioridade em investimentos de redução de consumo de energia. Grande parte da energia gasta por motores elétricos se deve a ineficiências operacionais e do processo em que estão inseridos. Baseado nisto, a presente dissertação tem o objetivo de, utilizando o processo de bombeamento de água para uma rede de trocadores de calor, demonstrar que pode ser obtida redução do consumo de energia elétrica quando há uma demanda variável de vazão para um determinado processo. Foi utilizado como estudo de caso o sistema de trocadores de calor com água salgada do Terminal de Madre de Deus, onde análises do processo de troca térmica e dos procedimentos operacionais foram realizadas, além de medições de gasto energético atual; por fim, foi obtida a perspectiva de eficiência com a utilização de inversores de frequência tipo PWM associada a mudanças operacionais. A partir dos resultados percebeu-se que a economia de energia elétrica com a implantação de variadores de velocidade e mudança nos procedimentos operacionais poderia ser de R\$ 32.205,48 reais por mês, número relevante para as condições atuais no setor industrial. Atualmente 78% da energia gasta não são necessárias, o tempo de retorno dos investimentos através de valores presentes líquidos foi de 23 meses, menos de dois anos para o estudo de caso.

**Palavras-chave:** Eficiência. Bombas centrífugas. Trocadores de calor.



## ABSTRACT

The cost of electricity in Brazil increased considerably during the 2015-2016 biennium, largely as a result of the water crisis that began in 2012. Associated with this, country economy is undergoing a severe recession and presented a 3.8% shrinkage in 2015 with a 3.3% outlook for 2016. This triggered a strong reduction of the country's industrial activity, unemployment increases and consumption reduce. As a result, efficiency processes are being sought with the aim of reducing fixed expenses and thus increasing net profits of the productive sectors. In industry, the electric motors energy consumption, corresponds to approximately 68% of total, this sector, in turn, consumes 32.5% of all country's electric energy used; It is natural that electric motors are the priority in investments to energy consumption reducing. A great part of the energy spent by electric motors is due to operating inefficiencies and of the process in which they are inserted. Based on this, the present dissertation has the goal of demonstrating that savings in electric energy can be obtained when there is a variable flow demand for a given process, using the pumping water process to a network of heat exchangers as an example. The saltwater heat exchanger system of the Madre de Deus Terminal was used as a case study, where analyzes of the thermal exchange process and operational procedures were performed, as well as current energy expenditure measurements; finally, the efficiency perspective was obtained with the use of PWM frequency inverters associated to operational changes. From the results it was realized that, electric energy savings with the implementation of variable speed drives and change in operating procedures could be R \$ 32,205.48 reais per month, which is considered relevant to current conditions in the industrial sector. Currently 78% of the energy spent is not needed, the investments time to return through net present values was 23 months, less than two years for the case study.

**Keywords:** Efficiency. Centrifugal pump. Heat Exchanger

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1 - Energia armazenada nos reservatórios das hidrelétricas SE/CO .....                | 13  |
| Figura 2 - Evolução da energia útil nacional 1984-2004.....                                  | 20  |
| Figura 3 - Esquemático de um consumidor de energia .....                                     | 21  |
| Figura 4 - Bomba centrífuga em corte.....  | 23  |
| Figura 5 - Exemplo de bomba vertical semi-submersa .....                                     | 24  |
| Figura 6 - Esquema simplificado de alimentação de uma cidade.....                            | 25  |
| Figura 7 - Exemplo de curva de uma bomba.....  | 26  |
| Figura 8 - Controle por recirculação.....  | 26  |
| Figura 9 - Controle por estrangulamento.....   | 26  |
| Figura 10 - Variações do sistema .....   | 28  |
| Figura 11 - Trocador de calor casco-tubo.....  | 29  |
| Figura 12 - Comportamento da corrente alternada.....   | 33  |
| Figura 13 - Esquema básico do motor de indução.....  | 33  |
| Figura 14 - Esquema inversor de frequência .....   | 34  |
| Figura 15 - Inversor de frequência PWM.....  | 35  |
| Figura 16 - Controle por inversor de frequência .....  | 36  |
| Figura 17 - Controle da vazão para um trocador de calor .....                                | 36  |
| Figura 18 - Decomposição de fluxo e torque .....   | 38  |
| Figura 19 - Superposição de ondas em um sistema PWM .....                                    | 40  |
| Figura 20 - Onda de saída controlada com sinal de controle constante .....                   | 40  |
| Figura 21 - Esquema básico de refrigeração de GLP .....                                      | 44  |
| Figura 22 - Trocadores do SEGAS que utilizam água salgada .....                              | 45  |
| Figura 23 - Processo de refrigeração .....   | 46  |
| Figura 24 - Processo de FLASH.....   | 48  |
| Figura 25 - Processo de <i>Boill-Off</i> .....   | 49  |
| Figura 26 - Aumento de temperatura no cilindro do GB-104 .....                               | 51  |
| Figura 27: -Resfriamento de água doce.....   | 52  |
| Figura 28 - Esquema de automação do P-0301 A/B .....   | 53  |
| Figura 29 - Processo de regeneração .....  | 56  |
| Figura 30 - Bombas de água salgada .....   | 61  |
| Figura 31 - Curvas das bombas: a) B-0222B (original); b) 0222B em associação; c) 0225C. .... | 63  |
| Figura 32 - Metodologias de coleta de dados (a) Instrumento local, (b) Câmera térmica .....  | 65  |
| Figura 33 - Painel da B-0222B e 0225B na subestação .....                                    | 67  |
| Figura 34 - Diagrama elétrico funcional da B-0222B .....                                     | 68  |
| Figura 35 - Pontos de instalação do analisador .....   | 69  |
| Figura 36 - Exemplo de medição do analisador de energia.....                                 | 70  |
| Figura 37 - Composição utilizada no ProPhyPlus .....   | 78  |
| Figura 38 - Registro da operação de refrigeração simulada .....                              | 87  |
| Figura 39 - Distribuição de temperaturas externas do EA-112 .....                            | 95  |
| Figura 40 - Gráfico de VPL por mês .....   | 107 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Aumento de temperatura admissível para diferentes classes de isolamento ..... | 37  |
| Tabela 2 - Trocadores de calor com água salgada do SEGAS .....                           | 43  |
| Tabela 3 - Dados básicos dos motores.....  | 63  |
| Tabela 4 - Composição média utilizada para o GLP .....                                   | 72  |
| Tabela 5 - Composição de sais na água do mar.....  | 73  |
| Tabela 6 - Cálculo entalpia GLP .....  | 75  |
| Tabela 7 - Composição utilizada no ProPhyPlus.....                                       | 76  |
| Tabela 8 - Trocadores envolvidos por processo .....                                      | 82  |
| Tabela 9 - Dados de projeto para os trocadores em condição rotineira.....                | 83  |
| Tabela 10 - Resultados elétricos do motor da B-0222B em condição rotineira.....          | 83  |
| Tabela 11 - Vazão de água por trocador na condição rotineira .....                       | 84  |
| Tabela 12 - Rendimento médio dos trocadores em condição rotineira .....                  | 86  |
| Tabela 13 - Dados de projeto para os trocadores na refrigeração .....                    | 87  |
| Tabela 14 - Vazão de água por trocador na refrigeração.....                              | 88  |
| Tabela 15 - Dados de projeto para os trocadores no aquecimento de GLP.....               | 89  |
| Tabela 16 - Vazão de água por trocador no aquecimento de GLP .....                       | 91  |
| Tabela 17 - Dados de projeto para os trocadores na regeneração .....                     | 92  |
| Tabela 18 - Vazão de água por trocador na regeneração.....                               | 93  |
| Tabela 19 - Temperaturas assumidas do gás para efficientização .....                     | 97  |
| Tabela 20 - Energia consumida por operação por mês.....                                  | 100 |
| Tabela 21 - Vazão necessária de água salgada .....                                       | 101 |
| Tabela 22 - Energia necessária por operação .....  | 102 |
| Tabela 23 - Necessidade de trocadores em condição rotineira.....                         | 104 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>13</b> |
| 1.1 MOTIVAÇÃO.....   | 13        |
| <b>1.1.1 Sistemas de linhas pressurizadas.....</b>                                 | <b>16</b> |
| 1.2 OBJETIVOS.....   | 17        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR INDUSTRIAL .....                                | 19        |
| 2.2 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICAIS SEMI-SUBMERSÍVEIS PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS ..... | 22        |
| <b>2.2.1 Eficiência da bomba .....</b>   | <b>24</b> |
| 2.3 TROCADORES DE CALOR CASCO TUBO .....   | 28        |
| <b>2.3.1 Eficiência em trocadores de calor casco-tubo .....</b>                    | <b>29</b> |
| 2.4 MOTORES ELÉTRICOS .....  | 32        |
| 2.5 VARIADORES DE VELOCIDADE PARA MOTORES ELÉTRICOS.....                           | 33        |
| <b>2.5.1 Inversor de frequência .....</b>  | <b>34</b> |
| <b>2.5.2 Tipos de inversores de frequência .....</b>                               | <b>37</b> |
| <b>2.5.3 Inversores de frequência PWM .....</b>                                    | <b>39</b> |
| <b>3 PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO DE GLP DO TEMADRE.....</b>                           | <b>42</b> |
| 3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO .....  | 44        |
| <b>3.1.1 Refrigeração .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.1.2 Flash e Boill-Off .....</b>   | <b>47</b> |
| <b>3.1.3 Resfriamento de água doce .....</b>                                       | <b>50</b> |
| <b>3.1.4 Aquecimento de GLP .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>3.1.5 Regeneração .....</b>   | <b>54</b> |
| 3.2 TROCADORES COM ÁGUA SALGADA.....   | 57        |
| <b>3.2.1 Sistema de controle de vazão de água salgada do GLP.....</b>              | <b>57</b> |
| <b>3.2.2 Estimativa de eficiência atual dos trocadores .....</b>                   | <b>58</b> |
| 3.3 BOMBAS DE ÁGUA SALGADA .....   | 60        |
| <b>3.3.1 Dados de projeto motores e bombas .....</b>                               | <b>62</b> |
| <b>3.3.2 Procedimento de operação .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>4 LEVANTAMENTO, TRATAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS.....</b>                         | <b>65</b> |
| 4.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DO CONSUMO.....  | 66        |
| 4.2 CÁLCULO DA ENTALPIA.....   | 71        |
| <b>4.2.1 Cálculo utilizando constantes termodinâmicas.....</b>                     | <b>74</b> |
| <b>4.2.2 Cálculo a partir do ProPhyPlus.....</b>                                   | <b>75</b> |
| <b>4.2.3 Comparação e método utilizado .....</b>                                   | <b>76</b> |
| 4.3 VAZÃO DE ÁGUA E POTÊNCIA DA BOMBA .....  | 78        |
| 4.4 ENERGIA CALCULADA POR PROCESSO.....  | 81        |
| <b>4.4.1 Condição rotineira (Boill-Off, Flash e Resfriamento).....</b>             | <b>82</b> |
| <b>4.4.2 Refrigeração .....</b>  | <b>86</b> |
| <b>4.4.3 Aquecimento de GLP .....</b>  | <b>89</b> |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>4.4.4</b> | <b>Regeneração .....</b>  | <b>92</b>  |
| 4.5          | ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TROCA TÉRMICA .....   | 94         |
| <b>5</b>     | <b>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO E VIABILIDADE FINANCEIRA DE IMPLEMENTAÇÃO.....</b> | <b>96</b>  |
| 5.1          | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA TROCA TÉRMICA .....  | 96         |
| 5.2          | POTENCIAL DE ECONOMIA .....   | 98         |
| <b>5.2.1</b> | <b>Consumo energético atual.....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>5.2.2</b> | <b>Consumo energético após ações de eficiência.....</b>                                 | <b>101</b> |
| 5.3          | ALTERNATIVA COM BLOQUEIO DOS TROCADORES.....  | 103        |
| <b>5.3.1</b> | <b>Medidas complementares necessárias.....</b>  | <b>105</b> |
| 5.4          | TEMPO DE RETORNO PARA OS INVESTIMENTOS .....  | 106        |
| <b>6</b>     | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>109</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>112</b> |
|              | <b>ANEXO A.....</b>   | <b>118</b> |
|              | <b>ANEXO B.....</b>   | <b>120</b> |
|              | <b>ANEXO C.....</b>   | <b>121</b> |
|              | <b>ANEXO D.....</b>   | <b>126</b> |
|              | <b>ANEXO E .....</b>  | <b>128</b> |
|              | <b>APÊNDICE A .....</b>   | <b>130</b> |
|              | <b>APÊNDICE B.....</b>  | <b>131</b> |
|              | <b>APÊNDICE C .....</b>   | <b>132</b> |
|              | <b>APÊNDICE D .....</b>   | <b>134</b> |
|              | <b>APÊNDICE E.....</b>  | <b>135</b> |

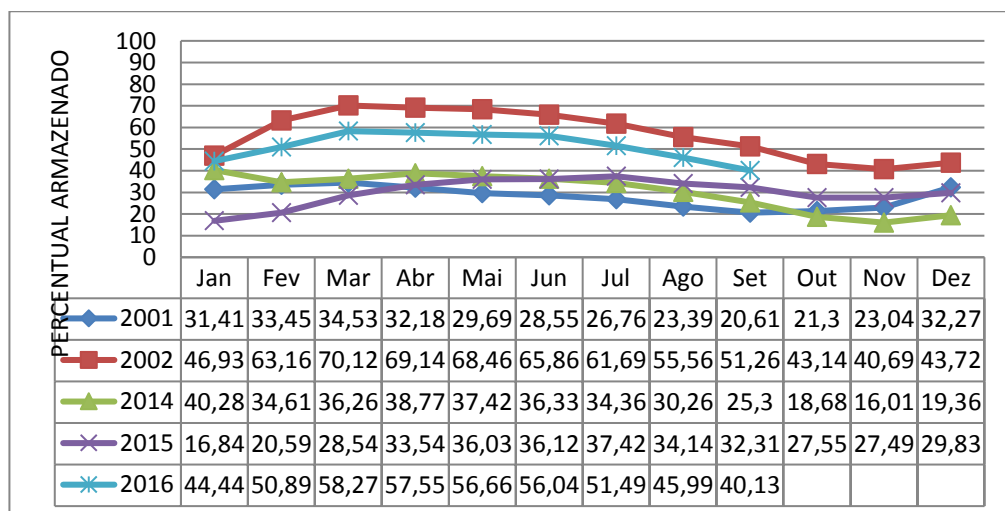
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Entre os anos de 2012 e 2015 o Brasil sofreu uma considerável crise energética, desta feita atenuada quando em comparação a que o país enfrentou em 2001; o principal motivo foi à falta de água nos reservatórios com conseqüente redução de operação do sistema de geração de energia a partir de fontes hidráulicas. Na atual conjuntura o país foi suprido pela energia gerada nas usinas térmicas (BRASIL, 2014a) que custam na sua geração, 17 % mais caro que a energia hidráulica (CCEE, 2015), este fato provocou a indústria e o setor acadêmico a investir em possibilidades para a economia de energia.

A atual crise elétrica tem motivação semelhante a que ocorrera em 2001 quando foi decretado pelo governo federal o racionamento de energia elétrica (Figura 1), porém, desta feita, devido aos investimentos do setor elétrico em fontes térmicas, o país pode ser abastecido eletricamente por estas usinas. Segundo o Balanço energético nacional de 2016 a geração elétrica a partir de fontes hidráulicas reduziu de 428.333 GWh em 2011 para 359.743 GWh em 2015 (BRASIL, 2016a), em contra partida a geração elétrica a partir de usinas térmicas, principalmente a carvão, biomassa e gás natural no mesmo período saltou de 100.720 GWh (BRASIL, 2014a) para 200.031 GWh<sup>1</sup> (BRASIL, 2016a).

Figura 1 - Energia armazenada nos reservatórios das hidrelétricas SE/CO



Fonte: Adaptado de ONS (2016).

<sup>1</sup> Inclui a energia produzida em centrais particulares e nuclear

Ainda com o aumento do consumo de energia elétrica em comparação com 2001, na crise atual não foi necessária a decretação de estado de racionamento como ocorreu naquele ano, isto em grande parte devido ao investimento maciço que o governo fez na geração de energia térmica pós-crise energética.

Percebe-se na Figura 1 que a crise hídrica no ano de 2014 foi, ao final do ano, pior do que a atravessada pelo país em 2001, no ano de 2015 e 2016 a situação de energia armazenada nos reservatórios melhora, porém não o suficiente para a parada completa de todas as térmicas e a redução dos valores de energia elétrica praticados.

Em 2001 o setor termelétrico contribuía com 12,8% da energia gerada no país (BRASIL, 2014b). Já em 2015 este número saltou para 34,4%, no entanto a fonte hidráulica para geração de energia ainda é muito importante para o setor energético brasileiro; em 2015, 61,9% do total de energia elétrica gerada no Brasil teve como fonte o setor hidráulico (BRASIL, 2016b).

Dependendo da usina, o custo da energia gerada a partir de fontes térmicas pode superar em 50% o custo da energia gerada por fontes hidráulicas (LIMA, 2014), portanto, o aumento do despacho de energia pelas térmicas ocasionou um aumento, também, do custo da energia elétrica no país, que foi repassado para o consumidor através do sistema de bandeiras tarifárias (Resolução normativa nº649 de 27 de Fevereiro de 2015 (ANEEL, 2015a)) e pelo aumento da tarifa de energia elétrica (Resolução Nº1858 de 27 de Fevereiro de 2015 (ANEEL, 2015b)) de 58 concessionárias do país.

O ano de 2015 foi conturbado para o cenário econômico internacional. Questões como refugiados de guerra, preço das commodities no mercado internacional e a restrição do fluxo de capitais decorrente do aumento dos juros no mercado americano provocaram uma redução do crescimento de economias emergentes. Entre os países emergentes os piores desempenhos observados foram obtidos por Brasil e Rússia, no Brasil a queda do PIB em 2015 foi de 3,8% (BRASIL, 2016b), a previsão para 2016 é de sutil melhora com queda de 3,3% (IMF, 2016). Todo este contexto provocou o encolhimento da atividade industrial no biênio 2015-2016, o nível de consumo diminuiu em virtude da menor confiança do consumidor no mercado e do aumento da taxa de juros além do aumento do desemprego no país.

Além da questão econômica envolvida, a problemática da emissão de gases de efeito estufa tornou-se muito mais evidente em 2015. O ano de 2015 foi o mais quente da história do planeta atingindo temperaturas médias 0,13°C maiores que o recorde anterior que havia sido em 2014 (BROWN; CABBAGE; MACCARTHY, 2016). Os cientistas afirmaram que a

principal causa do aquecimento global é a emissão de gases geradores de efeito estufa (GEE) que ao serem lançados na atmosfera absorvem a energia solar e a irradiam de volta para a superfície o que acarreta aumento da temperatura global (APPENZELLER, 2011).

Alinhado com esta preocupação e sabedores de que o principal causador do aumento da concentração de GEE na atmosfera é a queima de combustíveis fósseis, os líderes mundiais reunidos em Paris no mês de novembro de 2015 comprometeram-se a imbuir esforços de redução dos GEE a fim de manter o aumento da temperatura do planeta a no máximo 2°C com relação aos níveis da era pré-industrial (UNFCCC, 2015).

A geração de energia elétrica contribui fortemente para a emissão de GEE principalmente a partir de fontes não renováveis como o gás natural e carvão tão importantes para a geração termelétrica. Apesar de a matriz brasileira ser em grande parte suprida pelas hidrelétricas que possuem um fator de emissão na fase de operação muito baixo e a energia eólica apresentar expressiva expansão nos últimos anos, é perceptível o aumento das emissões de GEE principalmente pela operação das térmicas a gás natural no Brasil (OLIVEIRA; CARNEIRO; ANJOS, 2016).

Apesar do aumento do poder de compra do consumidor brasileiro que teve sua renda per capita acrescida em 32,4% entre 2001 e 2011 (BRASIL, 2012), o setor com a maior participação do consumo de energia elétrica ainda é a indústria com 32,5% de acordo com o balanço energético nacional de 2016. Oenning (2011) estima que de 60% do consumo energético do setor industrial no país tem como fonte os motores elétricos. Maheswaran et al. (2012), numa escala mais ampla, afirma que os motores elétricos consomem cerca de 43 a 46% da energia elétrica global; em relação ao setor industrial, no Brasil este percentual salta para 68% de toda a energia consumida (BRASIL, 2005), portanto diante do cenário que se desenha e do crescimento do setor industrial requerido e forçado pela população, torna-se plausível investir em eficiência energética dos motores elétricos e dos processos que os mesmos desempenham a fim de aperfeiçoar e reduzir ao máximo o seu percentual de consumo.

A utilização de motores de indução com variadores de velocidade pode aumentar em 60% a economia de energia elétrica (MURAVLEVA; MURAVLEV, 2003), dentre eles os inversores de frequência podem ser utilizados devido ao seu menor custo (BOLDEA, 2008). A utilização de um inversor pode variar a rotação do motor para que, associado a uma bomba, produza apenas a vazão requerida pelo processo ocasionando uma economia substancial de energia elétrica.



Vale salientar que o grande ganho de um processo acionado por motores elétricos muitas vezes não está diretamente associado à eficiência do motor unicamente, mas sim a uma otimização do processo onde o mesmo está inserido. Marchi, Simpson e Ertugrul (2012) conseguiram em sistemas de bombeamento de água reduzir o consumo de energia de 0,393 kWh/m<sup>3</sup> para 0,234 kWh/m<sup>3</sup> usando variadores de velocidade associados a bombas hidráulicas, enquanto Araújo (2003) alcançou 30% de economia de energia em sistemas de irrigação no setor agrícola. A indústria com sua grande capacidade e poder de consumo de energia elétrica, principalmente no tocante aos motores elétricos deve andar no mesmo viés assim como já propôs Oenning (2011) que esperava atingir uma economia anual de energia de aproximadamente 4000 MWh no setor de destilação de refinarias.

No tocante a utilização de motores em redes de trocadores de calor com demanda variável de vazão, é perceptível que há um grande campo para a eficiência energética, onde os motores são dimensionados para condições de vazão máxima e quando há a necessidade de redução desta, normalmente utiliza-se válvulas controladoras ou de estrangulamento como meio principal para controle, sendo assim, o motor está operando com um consumo que não é condizente com as reais necessidades momentâneas do próprio processo industrial, ocasionando assim, ineficiência do processo e desperdício de energia elétrica.

Além dos benefícios obtidos com a redução da energia elétrica quando utilizados variadores de velocidade benefícios associados à redução do número de ciclos do rotor são também percebidos verificando-se maior vida útil dos componentes do motor, tais como ventoinha, rolamentos e do próprio motor (ARAÚJO, 2003), assumindo o não comprometimento da refrigeração da máquina. Benefícios sociais também podem ser alcançados, visto que com a otimização dos motores elétricos e consequente redução do consumo de energia elétrica, pode-se tornar o país menos sensível a momentos de crise energética como o atravessado no biênio 2014-2015.

### **1.1.1 Sistemas de linhas pressurizadas**

Segundo Guimarães (2008) para uma vazão nula a potência aplicada ao fluido é zero, mas ainda assim é necessária potência para manter o eixo da bomba girando, potência esta que é dissipada em forma de calor e, por conseguinte em desperdício de energia. A partida com a válvula de descarga fechada é a melhor situação para o motor, já que reduz o tempo de duração do pico de corrente de partida, porém o funcionamento por longo período com vazão zero pode trazer malefícios devido ao superaquecimento do fluido no interior da bomba.

Através da Equação 1 (WEG, 2010) observa-se que quanto maior a vazão requerida pelo sistema (Q) mais potência este necessita (P<sub>cv</sub>), portanto soluções que otimizem a vazão de trabalho da bomba, trarão também uma redução na energia elétrica demandada pelo motor e, por conseguinte, economia de energia para o sistema.

$$P_{CV} = \frac{\gamma Q H_{man}}{75 \eta_b \eta_m} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma$ -peso específico do fluido (Kgf/m<sup>3</sup>);

Q-vazão da bomba (m<sup>3</sup>/s);

H<sub>man</sub>-altura manométrica (m);

$\eta_b$ -rendimento da bomba (adimensional);

$\eta_m$ -rendimento do motor (adimensional).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente dissertação é propor modelo de eficiência para o consumo energético de uma bomba que fornece fluido de troca térmica para uma rede de trocadores de calor.

Os objetivos específicos necessários para o alcance do anterior serão:

- a) Realizar revisão bibliográfica a fim de obter um panorama geral do funcionamento e particularidades de trocadores de calor, motores elétricos, inversores de frequência, bombas centrífugas e sistemas de bombeio de fluidos;
- b) Obter entendimento do processo de GLP refrigerado do Terminal de Madre de Deus, com foco nos trocadores de calor que utilizam água salgada, avaliar panorama de processo, procedimentos operacionais e necessidades termodinâmicas individuais dos trocadores.
- c) Desenvolver metodologia simplificada para estimar eficiência de trocadores de calor;
- d) Estudar meios de redução da vazão de água para o trocador mantendo as necessidades do processo.
- e) Medir o consumo elétrico da bomba em diversas operações e com diversas combinações de trocadores em operação na condição operacional atual.
- f) Obter vazão de água atual e comparar com a vazão de água necessária após implementadas as medidas de eficientização operacional e termodinâmica propostas.

- g) Calcular economia energética e financeira esperada com a implantação de variadores de velocidade nos motores, inclusive com o cálculo do tempo de retorno para o investimento inicial.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

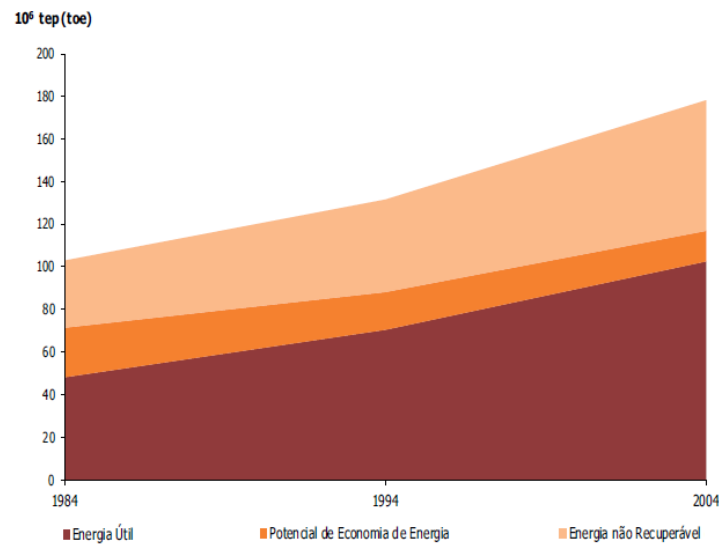
### 2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR INDUSTRIAL

Eficiência energética é sempre discutida em momentos de crise no setor, segundo Godoi (2011), compreende ações ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos.

A primeira ocorrência de atenção que geraram estudos sobre eficiência energética no Brasil deu-se com a crise do Petróleo na década de 70, esta motivou a criação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) em 1973. Na década de 80 o país sofreu com uma conjuntura recessiva que levou ao excesso de oferta de energia, aliado a crise do petróleo o governo incentivou as indústrias a utilizarem energia elétrica, neste momento grandes preocupações e estudos com processos mais eficientes surgiram no setor industrial culminando com estudos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo e do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) do Rio de Janeiro, estas pesquisas contribuíram para que no ano de 1985 o Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) fosse criado pelo Ministério das Minas e Energia (MME) (PROCEL, 2006, p.17-19). Após a criação do PROCEL duas novas crises eclodiram no país a crise energética de 2001 e a crise energética atual, conforme já discutido anteriormente.

Todo este trabalho obteve no país resultados práticos entre os anos de 1984 e 2004, quando houve uma redução na quantidade de perdas dos processos energéticos nacionais que pode ser percebido pela redução de energia recuperável nesse período (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da energia útil nacional 1984-2004



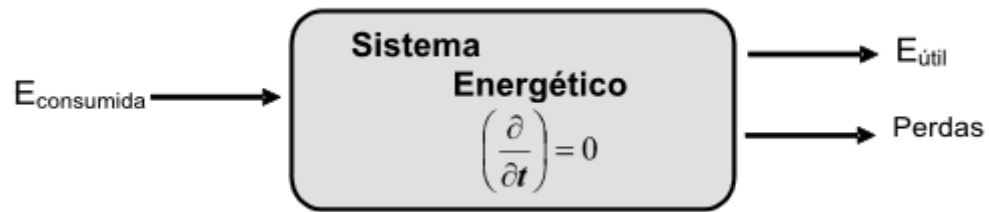
Fonte: Brasil (2016a, p. 200).

O Programa de Conservação de Energia Elétrica contribuiu para a melhoria de rendimento energético de equipamentos finais, porém, segundo Luiz Eduardo Menandro de Vasconcelos no prefácio de PROCEL (2006), a conservação de energia está apoiada em dois conceitos básicos, onde um deles diz respeito à mudança de hábitos dos consumidores o outro se relaciona a eficiência energética onde técnicas e tecnologias aplicadas a processos industriais podem ser a base para uma economia considerável de energia.

Programas capitaneados pelo governo federal têm contribuindo para a efficientização do consumo de energia elétrica no país principalmente após a crise de 2001. Godoi (2011) focalizou 217 projetos de eficiência energética capitalizados com recursos da Lei Nº 9.991 de 24/07/2000, que alcançaram a marca de R\$ 161 milhões de reais em investimentos e atingiram uma economia de 626 GWh. No entanto, o balanço de energia útil entre 1984 e 2004 visualiza ainda uma possibilidade de economia energética como pode ser visto na Figura 2, apesar da efficientização alcançada desde 1984 quando o Ministério das Minas e Energia começou a mensurar a eficiência dos processos, existe ainda um grande campo para estudos de processos e equipamentos mais eficientes.

Segundo PROCEL (2006, p. 46) a eficiência energética pode ser mensurada a partir do balanço entre a energia cedida e a energia efetivamente utilizada para executar um determinado processo. Esquema simplificado pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Esquemático de um consumidor de energia



Fonte: PROCEL (2006, p. 46).

A partir da Figura 3 pode-se determinar o rendimento do processo descrito e assim estimar-se a eficiência energética do mesmo. A partir da Equação 2 (PROCEL, 2006, p.46) é possível quantificar a eficiência de um determinado processo tomando-se como referência a Figura 3.

$$\eta_{\text{energ}} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} = \frac{E_{\text{consumida}} - \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} \quad (2)$$

Onde:

E= energia (J);

$\eta_{\text{energ}}$ = rendimento energético ou eficiência energética (adimensional).

Fica claro que o processo se torna mais eficiente à medida que as perdas são reduzidas e o  $\eta_{\text{energ}}$  se aproxima de “1”, isso significaria 100% da energia consumida transformada em energia útil, resultando em perdas nulas e eficiência máxima.

No âmbito de motores elétricos, em CNI (2015) foi reportado que para motores elétricos a utilização de variadores eletrônicos de velocidade deve ser realizada sempre que possível visando eficiência energética do processo ao qual o mesmo está associado, afirmando ainda que em sistemas de bombeamento de fluidos deve-se verificar a existência de sobre vazão tendo em vista as necessidades da operação além de válvulas de fluxo restringidas ou fechadas, estes dois fatores associados ou isoladamente contribuem para a baixa eficiência do processo.

Stoffel (2015), no seu estudo sobre eficiência de motores em processos, concluiu que é necessário o aumento da utilização de motores de alta eficiência, o uso de variadores de velocidade quando aplicáveis e a otimização do sistema como um todo, isto é, redimensionamento e reprojetado de todas as partes do sistema. Em geral os motores apresentam

eficiências superiores a 90%, no entanto, são geralmente mal dimensionados e mal operados, ressaltando que tecnologias e comportamentos operacionais otimizados podem aumentar a eficiência de um processo com motores elétricos a números bem razoáveis. Waide e Brunner (2011) estimaram que até 2030 pode-se economizar aproximadamente 322TWh com otimizações em motores elétricos, observando que processos onde há grande variação da vazão demandada são ideais para a utilização de inversores de frequência, e, processos que operam por batelada idealmente, devem operar a vazão máxima com o menor tempo de operação possível.

A gestão da energia no tocante a investimentos em processos mais eficientes, ainda está diretamente pautada na questão financeira, ainda que os benefícios sociais da redução da demanda elétrica sejam extremamente amplos, a decisão gerencial é pautada em custos e payback<sup>2</sup>, onde 90% dos custos de um motor elétrico com uma vida útil de 20 anos é com energia elétrica (WAIDE ; BRUNNER, 2011), e além disso o momento é propício para o estudo e aplicabilidade de tecnologias eficientes devido ao aumento considerável no custo da energia elétrica no ano de 2015.

Ferreira (2010) afirmou que uma companhia é ineficiente à medida que não se utiliza da tecnologia disponível para maximizar seu resultado. A redução dos custos e a maximização dos resultados mantendo-se a qualidade dos produtos e/ou processos é o conceito base da eficiência, que é possível em grande parte, devido ao avanço da tecnologia de processos e máquinas. Fazendo-se um parâmetro com o foco do estudo desta dissertação, a eficiência será alcançada com a redução do consumo energético dos motores de acionamento das bombas e manutenção da troca térmica em valores estabelecidos e requeridos pelo processo.

## 2.2 BOMBAS CENTRIFUGAS VERTICAIS SEMI-SUBMERSÍVEIS PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

Bombas são equipamentos mecânicos destinados a transferir líquidos de um ponto a outro em um determinado processo. Para este fim necessitam de uma fonte externa de energia que normalmente advém dos motores elétricos.

Dentre diversos modelos construtivos, um dos mais utilizados é, sem dúvida, as bombas centrífugas (OENNING, 2011), que se utilizam da energia centrífuga imposta ao líquido pela rotação de um impelidor<sup>3</sup> para impulsionar o produto.

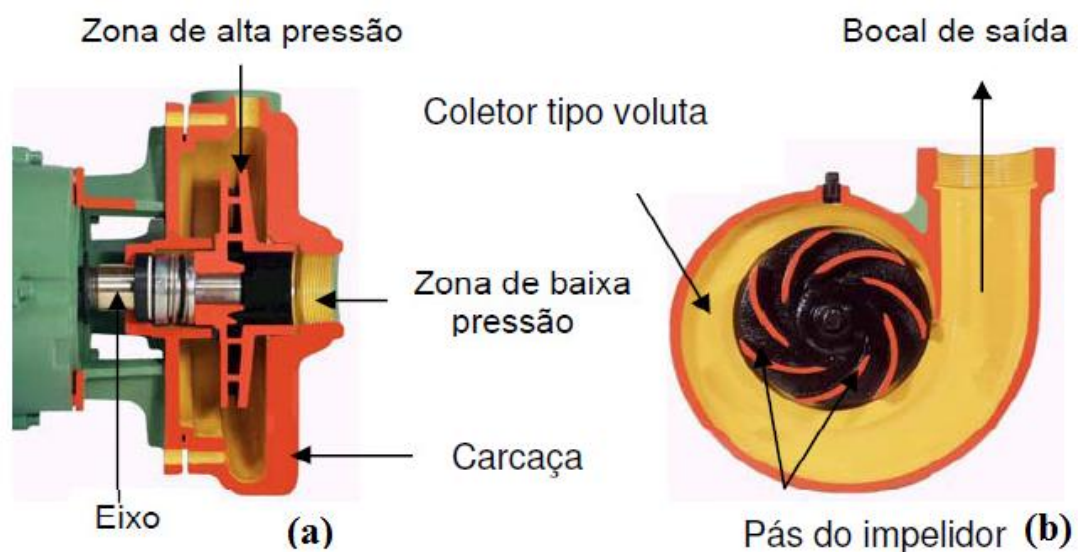
---

<sup>2</sup> Tempo de retorno financeiro de um investimento.

<sup>3</sup> Alguns autores também utilizam a denominação de rotor

Com a movimentação do impelidor o líquido fica sujeito à força centrífuga e é forçado para a periferia da carcaça, com isso cria-se uma zona de baixa pressão no bocal de sucção da bomba que uma vez conectada a um reservatório, succiona o líquido nele contido; por sua vez com a continuação do movimento do impelidor o líquido da periferia da carcaça é forçado a seguir para o bocal de saída devido às características construtivas da carcaça que o move desta maneira (MATTOS e FALCO, 1998, p.116). Assim ocorre o processo de bombeamento centrífugo, exemplo de uma bomba em corte pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Bomba centrífuga em corte



(a) Bomba centrífuga em corte transversal / (b) Corte longitudinal da carcaça da bomba

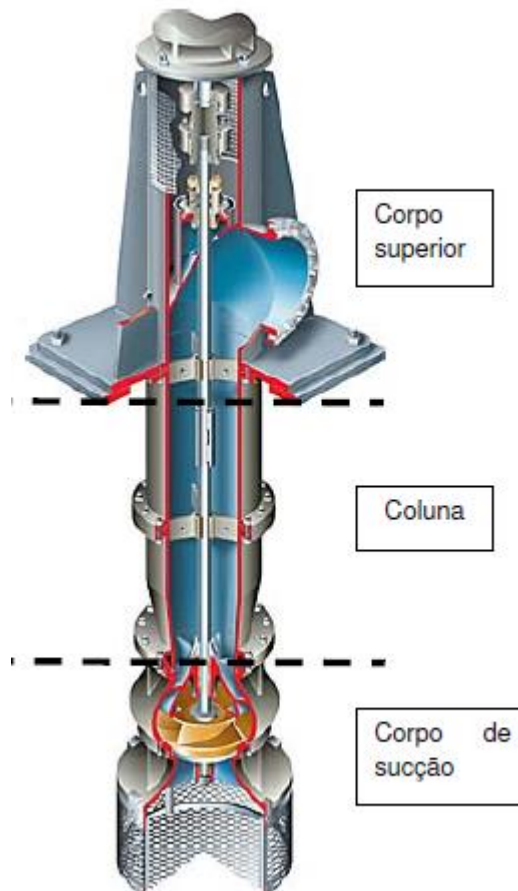
Fonte: Loeser (2011, p. 26).

As bombas centrífugas verticais possuem as mesmas características e componentes das bombas centrífugas horizontais, no entanto, são montadas com seu eixo na vertical em espaços onde a lâmina de líquido a ser bombeado está distante da superfície. Em casos como este, faz-se necessário utilizar uma bomba semi-submersa, ou seja, bomba onde parte do corpo fica permanentemente imerso no líquido garantindo assim que o rotor esteja permanentemente “afogado” (LOESER, 2011).

Loeser (2011) afirmou ainda que detalhes técnicos variáveis como nível de submersão, pressão necessária, altura do acionador dentre outros fazem do projeto de bombas verticais semi-submersíveis únicos e que devem ser pensados e dimensionados para cada aplicação.



Figura 5 - Exemplo de bomba vertical semi-submersa



Fonte: Loeser (2011, p.21).

No exemplo apresentado na Figura 5, o corpo de sucção deve permanecer imerso no líquido de maneira que o bombeamento seja possível, o corpo superior fica acessível na superfície facilitando assim ações de manutenção e a coluna acomoda o eixo que transmite a energia do motor até o impelidor e o duto de descarga que encaminha o líquido bombeado até o bocal de saída da bomba na superfície.

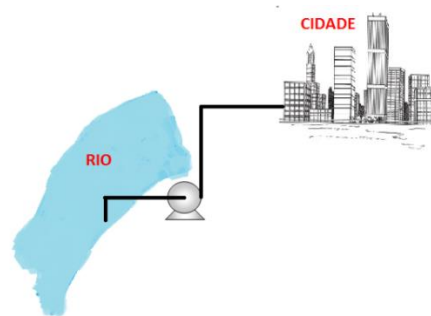
### 2.2.1 Eficiência da bomba

Mohan, Undeland e Robbins (2003), afirmaram que a energia elétrica requerida ao motor pela bomba é proporcional ao cubo da velocidade de rotação do seu eixo (Equação 3), sendo  $k_2$  uma constante de proporcionalidade. Portanto percebe-se o grande potencial de redução de consumo de eletricidade com uma redução da rotação da bomba.

$$\mathbf{Energia=k_2.(Velocidade)^3} \quad (3)$$

Processos industriais requerem fluxo de líquidos para diversas necessidades; fluido de refrigeração para trocadores de calor, transporte entre reservatórios, alimentação de matéria prima para processos contínuos dentre outros, no entanto, nem sempre é viável economicamente ou possível estruturalmente manter uma bomba dedicada para a alimentação de cada processo. Algumas utilizações requerem uma rede em que o fluído de descarga de uma bomba centrífuga possa ser encaminhado para diversos consumidores e quase sempre os consumidores possuem necessidades variáveis durante o período de operação. Exemplo claro pode ser visualizado na Figura 6 onde uma cidade é alimentada por uma bomba que capta água de um rio. É fácil perceber que, caso a alimentação fosse direta na rede de distribuição, haveria uma demanda variável durante o dia, em contrapartida a bomba deve atender a todas as situações e necessidades diárias da cidade, por isso é sempre dimensionada para o pico de demanda. Nos períodos em que o consumo da cidade é reduzido, a bomba é controlada por fechamento das válvulas de admissão em cada ponto consumidor e começa a operar abaixo da sua vazão nominal.

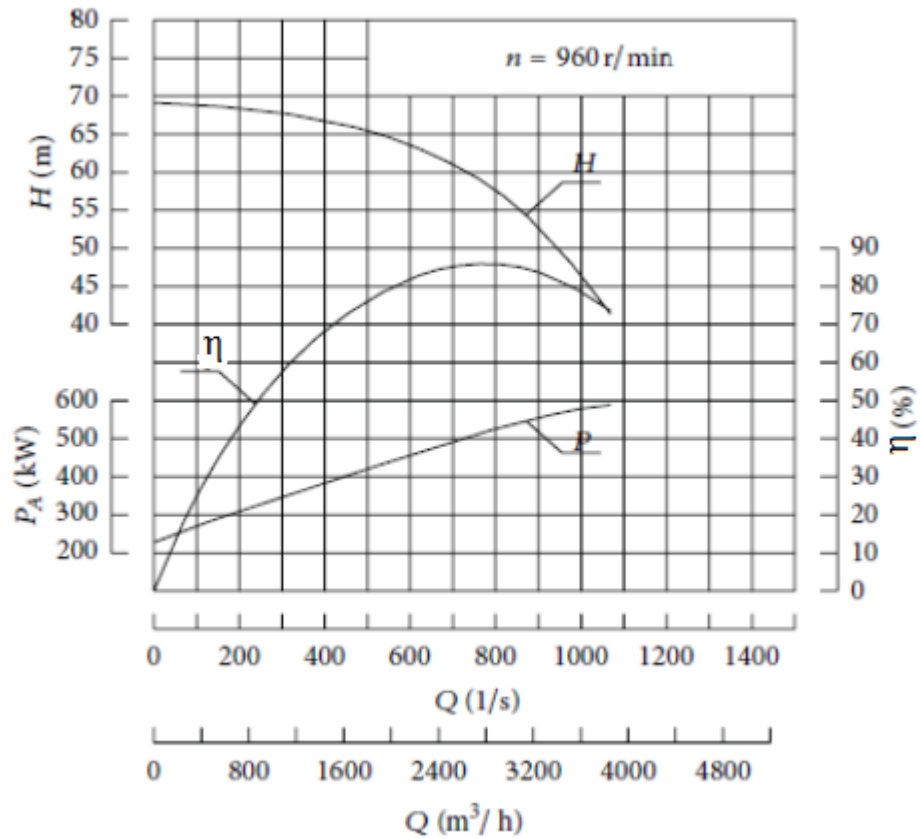
Figura 6 - Esquema simplificado de alimentação de uma cidade



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

A operação abaixo do ponto ideal do conjunto motor-bomba (ponto de máximo rendimento) implica em baixa eficiência de operação da bomba e do motor elétrico, além de energia consumida superior ao que poderia ser obtido com a otimização do processo, fato que pode ser verificado na Figura 7, quando há redução da vazão abaixo de aproximadamente 2800 m<sup>3</sup>/h percebe-se uma redução da eficiência da bomba ( $\eta$ ).

Figura 7 - Exemplo de curva de uma bomba



Fonte: Adaptado de Yin et al. (2013).

Normalmente o controle de vazão em sistemas não eficientizados é realizado de duas formas, através de inserção de uma válvula de estrangulamento (Figura 9) ou de uma válvula de recirculação (Figura 8).

Figura 8 - Controle por recirculação

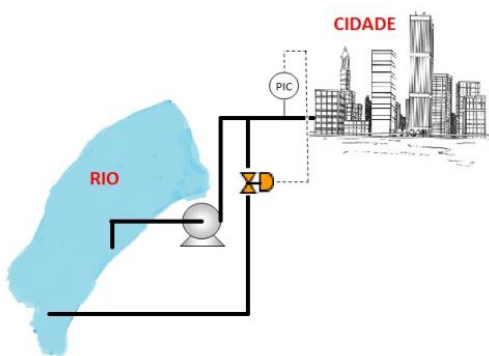
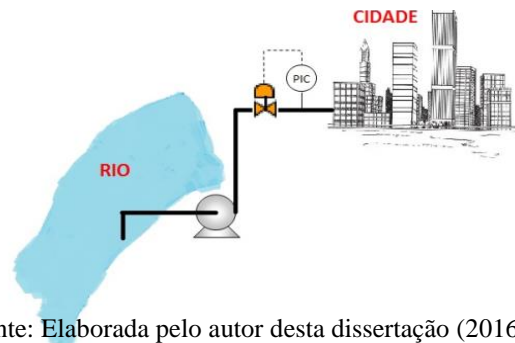


Figura 9 - Controle por estrangulamento



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

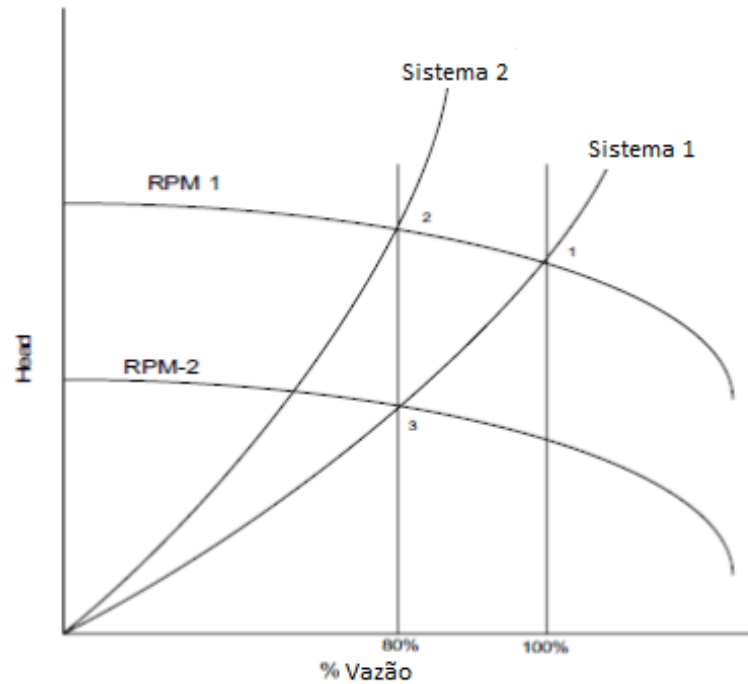
Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Em ambas as formas apresentadas há um grande gasto energético desnecessário no período de menor demanda. Existe associado aos dois sistemas uma válvula de controle que é modulada a partir de um transmissor e controlador de pressão da rede (PIC), quando há grande consumo, a pressão da rede tende a cair e a válvula abre no caso por estrangulamento, ou fecha no caso por recirculação; o contrário ocorre no período de menor demanda, desta feita o controlador de pressão (PIC) “enxerga” o aumento da pressão e a controla fechando mais a válvula de controle no caso por estrangulamento ou abrindo no caso de haver recirculação.

O modelo por válvula de estrangulamento altera a curva do sistema de maneira semelhante ao caso explanado na Figura 10, já o modelo com recirculação é menos danoso, pois não altera a curva do sistema e, portanto, não interfere no rendimento da bomba (CHATT, 2006), mas igualmente demanda uma energia (vazão) maior do que o sistema realmente necessita. É notório nos dois modelos de controle que em ambos há desperdício no momento de menor demanda além de, no caso por estrangulamento, outros danos serem inseridos ao sistema como perdas de carga, ampliações de vazamentos (FUPAI/EFFICIENTIA, 2005) e redução da vida útil dos componentes do sistema associado ao aumento de cargas radiais e axiais nos mancais da bomba e, por conseguinte do motor (OENNING, 2011).

Neste âmbito, inversores de frequência conforme será visto em 2.5.1, podem ser um dos meios para a obtenção da eficiência requerida. Sistemas motrizes que alimentam redes consumidoras possuem uma variedade de demanda muito grande. Sistemas consumidores de água doce residencial, por exemplo, podem sofrer redução de até 75% (MARCHI; SIMPSON; ERTUGRUL, 2012). No caso exposto na Figura 10, caso houvesse uma redução de 20% da necessidade de vazão nominal a curva do sistema sairia da condição 1 para a condição 2 devido ao estrangulamento da descarga, no entanto, a curva da bomba permaneceria inalterada para a velocidade 1 (RPM-1). Caso houvesse a possibilidade de variação da rotação à nova condição (RPM-2), haveria um menor consumo de energia para a mesma condição de vazão representada, neste caso, a operação se daria no ponto 3.

Figura 10 - Variações do sistema



Fonte: Adaptado de Chatt (2006).

Ressalta-se que o grande ganho de um processo acionado por motores elétricos, normalmente, não está associado apenas à eficiência do motor, mas sim a uma efficientização do processo onde o mesmo está inserido como um todo.

### 2.3 TROCADORES DE CALOR CASCO TUBO

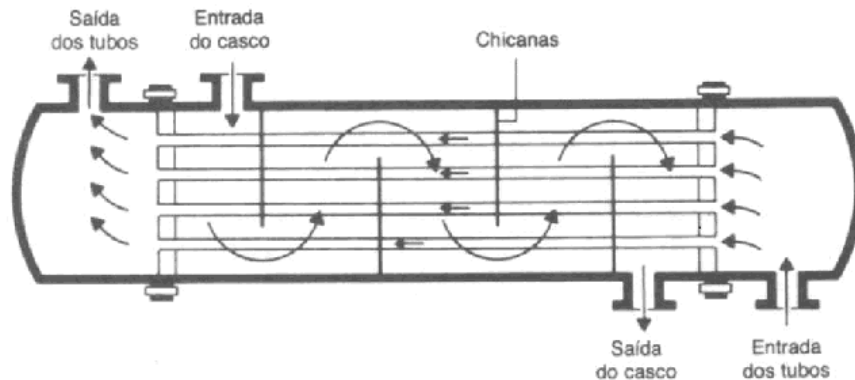
Trocadores de calor são equipamentos mecânicos que como o próprio nome sugere realizam a troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas.

Na indústria a troca térmica desempenha vital importância para a obtenção do produto final, onde a mudança de característica dos produtos com a variação da sua temperatura, permite que determinadas fases do produto ou muitas vezes o produto final seja obtido pela simples mudança de sua temperatura. Devido a isso o trocador de calor é um dos principais equipamentos em qualquer processo industrial.

Um dos tipos mais comuns de trocador de calor é o trocador casco-tubo, que é constituído de uma estrutura externa que fica em contato com o ambiente e um feixe tubular interno que a atravessa de uma extremidade a outra. Um dos fluidos de troca térmica passa pelo casco banhando o feixe tubular enquanto o outro o atravessa. A superfície dos tubos do

feixe fica em contato com ambos os fluidos e, devido à característica do seu material de construção permite a troca térmica entre estes (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Figura 11 - Trocador de calor casco-tubo



Fonte: Incropera e Dewitt (2003, p. 453).

Incropera e Dewitt (2003) afirmaram ainda que, existem outros modelos de trocador de calor como o trocador de placas, os compactos, os de serpentina dentre outros.

Normalmente, em um processo dinâmico dificilmente se tem fluidos quentes e frios com temperaturas finais desejadas opostas. O mais comum é ter-se apenas um objetivo, ou seja, um fluido que se deseja aquecer ou um fluido que se deseja resfriar; nestes casos faz-se necessária a criação de um processo auxiliar de fluido de troca térmica. Este processo é desenvolvido com a finalidade de fornecer ao trocador de calor um fluido na temperatura ideal e coletar o mesmo no retorno aquecido ou resfriado, sendo que, o fluido de retorno pode passar por outro processo de troca térmica para atingir a temperatura ideal ou ser descartado na natureza e coletado posteriormente à temperatura ambiente.

### 2.3.1 Eficiência em trocadores de calor casco-tubo

A eficiência em trocadores de calor tem muitas condicionantes e exprimem basicamente a capacidade de transferir calor do fluido quente para o fluido frio. Um trocador de calor terá efetividade de 100% se a quantidade de troca térmica dos fluidos quente e frio se igualarem (INCROPERA; DEWITT, 2003, p. 455).

Questões como isolamento térmico externo, grau de incrustação nas paredes do feixe tubular, material utilizado nos tubos, condições de fluidez dentro do trocador dentre outros podem influenciar no cálculo e efetividade do trocador fazendo com que seu

dimensionamento e estudo sejam procedimentos complexos, principalmente em trocadores com um longo tempo de operação nos quais não se conhece suas condições internas (AWAD, 2011).

Existem diversas metodologias de cálculo da eficiência de um trocador de calor, sendo necessário comparar as capacidades projetada de transferência de calor e a instantânea. Incropera e Dewitt (2003) relataram que os métodos MLDT (Média logarítmica das diferenças de temperatura) e NUT (Número de unidades de transferência) podem ser utilizados em qualquer problema envolvendo cálculo de trocadores de calor casco-tubo, no entanto Wen et al. (2015), em comparação com dados experimentais detectou que o valor do coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) tende a ter uma discrepância dos valores teóricos a medida que se aumenta o fluxo do trocador.

O método MLDT tem como parâmetros principais as temperaturas de entrada e saída dos fluidos do trocador, e permite o cálculo do calor trocado no equipamento através da Equação 4 (INCROPERA; DEWITT, 2003, p. 457):

$$q=U.A.\Delta T_{lm} \quad (4)$$

Onde:

$U$ = coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2.K$ );

$A$ = área de troca térmica ( $m^2$ );

$\Delta T_{lm}$  = média logarítmica da diferença de temperatura ( $K$ ).

A média logarítmica da diferença de temperatura ( $\Delta T_{lm}$ ) é obtida conhecendo-se os valores de entrada e saída deste parâmetro. Através da comparação deste valor com a taxa total de transferência de calor (Equação 5) pode-se determinar a eficiência do trocador de calor.

$$q_{max}=m.(h_e-h_s) \quad (5)$$

Onde:

$m$ = vazão mássica do fluido ( $Kg/s$ );

$h_e$ = entalpia na entrada ( $J/Kg$ );

$h_s$ = entalpia na saída ( $J/Kg$ ).

O método NUT é utilizado quando não se tem conhecimento pleno das temperaturas de entrada e saída dos fluidos, neste método obtém-se a efetividade do trocador em função do parâmetro adimensional NUT e das capacidades térmicas máxima ( $C_{\max}$ ) e mínima ( $C_{\min}$ ) dos fluidos.

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = f\left(NUT \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (7)$$

Onde:

$q$ = calor trocado (W);

$q_{\max}$ =calor trocado na eficiência máxima (J/Kg);

$\varepsilon$ = efetividade (adimensional).

Em ambos os métodos demonstrados por Incropera e Dewitt (2003), é necessário o conhecimento de um parâmetro denominado por coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ). Este índice é o que traz mais incertezas e dificuldades para o cálculo da eficiência. Incropera e Dewitt (2003) afirmaram ainda que o valor do coeficiente global de transferência de calor para trocadores de calor pode ser obtido através da Equação 8:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_o hA)_c} + \frac{R_{f,c}}{(\eta_o A)_c} + R_w + \frac{R_{f,h}}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o hA)_h} \quad (8)$$

Onde:

$\eta_o$ = eficiência global da superfície ou efetividade de temperatura (adimensional);

$h$ = coeficiente de convecção ( $W/m^2.K$ );

$R_f$ = fator de incrustação ( $m^2.K/W$ );

$R_w$ = resistência condutiva ( $m^2.K/W$ ).

Os índices “c” e “h” representam o fluido de menor e o de maior temperatura respectivamente, o valor da resistência condutiva ( $R_w$ ) representa a resistência térmica para a troca de calor através da condução pelo metal dos tubos e depende da superfície onde a troca



ocorra, a eficiência global da superfície ( $\eta_o$ ) está relacionada com as características das aletas e da efetividade unitária das mesmas.

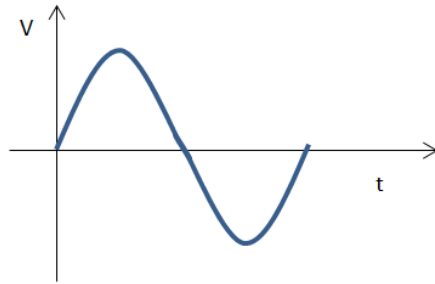
O fator de incrustação ( $R_f$ ) representa a deficiência da troca causada pelas incrustações no trocador. A incrustação surge com o passar do tempo de operação quando os resíduos presentes e provocados pelo fluido de troca térmica se fixam na parede do feixe de tubos, isto reduz a eficiência do trocador de calor. Existem tabelas que estimam os valores do fator de incrustação, no entanto, seu valor é variável e de difícil definição, pois, além do tempo de operação depende da velocidade do fluido, temperatura de operação, detalhes construtivos do trocador dentre outros (INCROPERA; DEWITT, 2003, p. 454).

Awad (2011) destacou que a incrustação é o maior problema sem solução em trocadores de calor ocasionado por um complexo fenômeno causado por deposição mecânica, eletrostática, corrosão, processos biológicos dentre outros fatores. Devido a esta complexidade, o fator de incrustação é um dos maiores dificultadores para o projeto e cálculo de trocadores de calor.

## 2.4 MOTORES ELÉTRICOS

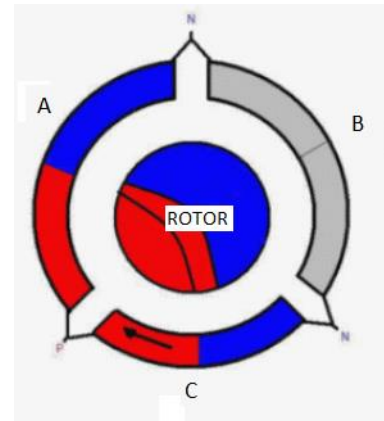
Motores elétricos são máquinas destinadas a promover a rotação de um eixo através do consumo de energia elétrica. Motores de corrente alternada recebem tensão alternada da rede no estator, este por sua vez gera um campo magnético que induz uma corrente no rotor provocando o giro impulsionado pela interação entre os campos magnéticos do estator e rotor. O estator possui, em motores básicos, 3 enrolamentos (bobinas) defasados entre si de  $120^\circ$  (Figura 12) que geram um campo magnético pela passagem da corrente. Este campo magnético também é variável, uma vez que a tensão atinge um pico máximo e um mínimo 60 vezes por segundo (60Hz). Na Figura 13, pode-se ver a exemplificação de um ciclo de tensão.

Figura 13 - Comportamento da corrente alternada



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Figura 12 - Esquema básico do motor de indução



Fonte: Adaptado de Lino (2015.)

Como o estator possui 3 bobinas, caso todas elas estivessem em fase, isto é, com o mesmo valor de corrente e tensão em um determinado instante, não haveria a produção de um campo magnético girante (Figura 13). A formação geométrica trifásica das bobinas (Figura 12), distantes entre si de  $120^\circ$ , quando percorridas por três correntes elétricas trifásicas, também defasadas em  $120^\circ$  elétricos, produzem o campo magnético girante do estator. Este campo, por sua vez, induz nas bobinas do rotor correntes que também geram um campo magnético girante do rotor. A interação destes dois campos magnéticos é que produz o torque ou conjugado mecânico que movimenta o eixo da máquina.

Motores elétricos de corrente alternada normalmente possuem rotações fixas, definidas pela frequência de alimentação da rede, que normalmente é de 50 ou 60Hz. No entanto, por meio de conversores eletrônicos é possível alterar a frequência de alimentação do motor de modo a alterar sua rotação (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

## 2.5 VARIADORES DE VELOCIDADE PARA MOTORES ELÉTRICOS

Percebe-se que a velocidade com que o rotor gira, é proporcional a quantidade de ciclos que a corrente e a tensão perfaz num determinado tempo, com os variadores de frequência eletrônicos é possível alterar a frequência de alimentação do motor para valores controlados por dispositivos eletrônicos de modo a atuar diretamente na velocidade do rotor e por consequência do eixo do motor. A rotação do motor obedece a Equação 9 (WEG, 2010),

percebe-se uma relação direta com a frequência de alimentação, ou seja, reduz-se a frequência reduz-se também a rotação.

$$n = \frac{120 f_1 (1-s)}{p} \quad (9)$$

Onde:

$f_1$  = frequência de alimentação (Hz);

$n$  = rotação do eixo (RPM);

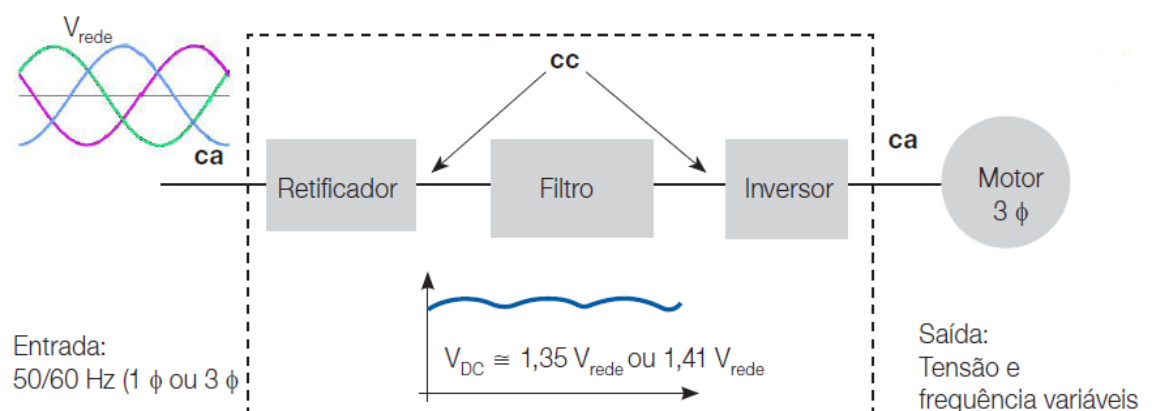
$s$  = escorregamento (%);

$p$  = número de polos (adimensional).

### 2.5.1 Inversor de frequência

Os inversores de frequência funcionam por meio de retificadores e inversores da tensão de entrada, primeiramente as três fases da corrente alternada são retificadas para corrente contínua que passa por um filtro ou link DC, onde ocorre a regulagem da tensão ainda de forma contínua para a magnitude que o processo requer. Do filtro a corrente contínua segue para o inversor que cede ao motor elétrico três fases de corrente alternada de magnitude controlada, esquema pode ser melhor visualizado na Figura 14 (WEG, 2010).

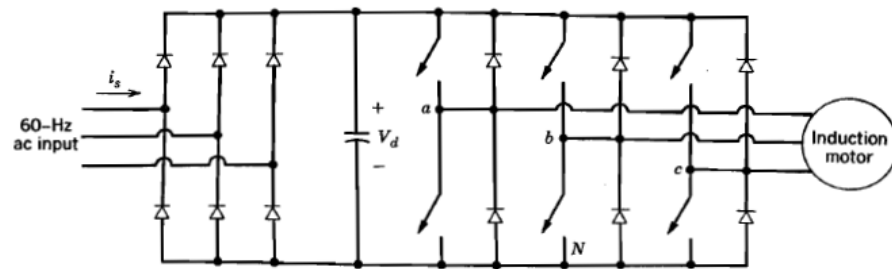
Figura 14 - Esquema inversor de frequência



Fonte: WEG (2010, p. 7).

Inversores estáticos indiretos de frequência com tensão imposta (*Pulse Width Modulated-PWM*) são os mais empregados para utilização em motores de baixa tensão (WEG, 2010) devido principalmente à sua razão custo-benefício quando comparado a outros sistemas de alteração de frequência (BOLDEA, 2008).

Figura 15 - Inversor de frequência PWM



Fonte: Mohan, Undeland e Robbins (2003, p. 420).

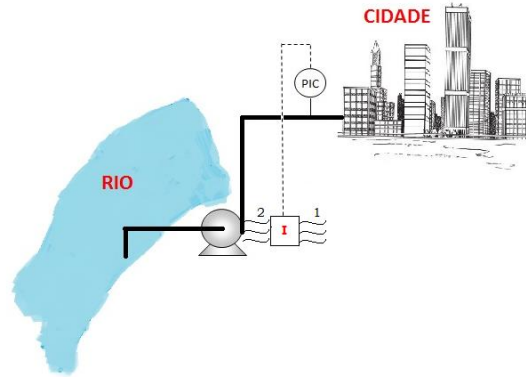
A velocidade de um motor elétrico pode ser controlada a partir da variação da sua frequência, que controla a velocidade síncrona e por sua vez a velocidade do motor (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Uma das grandes utilizações do inversor de frequência é o controle de velocidade em motores elétricos, a variação de frequência e tensão permite obter-se a velocidade ótima de um motor elétrico em determinada aplicação.

O inversor é provido de um controlador eletrônico necessário para receber o sinal referente a frequência de saída desejada, este, pode advir de diversas fontes que devem ser programadas previamente pelo usuário, no entanto, em sistemas operacionais, informações básicas de automação devem estar associadas para prover o inversor das informações mínimas acerca da rotação necessária. No caso de bombas centrífugas a entrada de sinal pode advir de um medidor e transmissor de vazão ou de pressão da descarga da bomba.

Em um controle com inversores de frequência associado a sistemas bombeadores, a energia cedida ao fluido é exatamente a energia demandada pelo sistema. Analogamente ao exemplificado sobre a alimentação de uma cidade em 2.2.1, no cenário com variadores de velocidade (Figura 16) o *Indicador e Controlador de Pressão (PIC)* enviaria para o inversor de frequência (I) a pressão instantânea da rede, por sua vez o inversor, que já havia sido previamente configurado para manter a pressão em um patamar onde todos os consumidores tivessem fornecimento de água adequadamente, controla eletronicamente a frequência enviada ao motor elétrico, da frequência 1 cedida pela rede à frequência 2 requerida pelo

sistema. Com esta variação da frequência o eixo do conjunto moto-bomba irá alterar sua velocidade para a rotação instantânea ótima.

Figura 16 - Controle por inversor de frequência

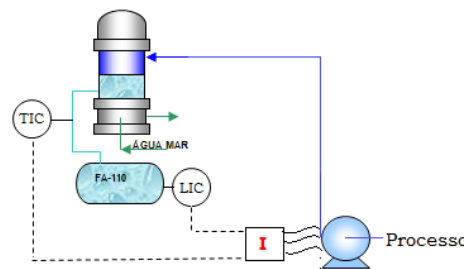


Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Neste tipo de modelo, o inversor controla a velocidade do eixo a partir de informações de instrumentos de controle (KRIEL; JOUBERT; MARAIS, 2013), neste caso o PIC.

Conforme propôs Oenning (2011), o controle com inversores pode também ser usado em aplicações industriais complexas, onde certamente será mais efetivo no tocante a economia de energia, processos de controle e automação complexos podem vir associados ao controle da rotação de bombas para atingir-se um controle mais preciso. Diversas entradas de sinal podem ser utilizadas para efetuar o controle eletrônico, assim como no exemplo anterior foi utilizada a variável pressão, controles a partir da vazão, temperatura, nível de um reservatório, dentre outros podem ser necessárias para um controle mais eficiente. No exemplo da Figura 17 o controlador do inversor analisa as variáveis, temperatura de saída do trocador e nível de um vaso de condensado e a partir de uma lógica de programação controla a vazão de fluido para o processo.

Figura 17 - Controle da vazão para um trocador de calor



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

No entanto deve-se ter a máxima atenção na magnitude da redução da velocidade, a maioria dos motores assíncronos necessita de refrigeração forçada que é realizada por ventoinhas acopladas diretamente ao eixo do motor, quando há a redução da velocidade deste há também a redução do fluxo de ar que arrefece o motor elétrico. Essa redução pode chegar, em alguns casos, a 50% da rotação nominal sem prejuízo (KRIEL; JOUBERT; MARAIS, 2013), no entanto recomenda-se a verificação antecipada da classe do motor a fim de analisar os efeitos do aumento de temperatura no enrolamento.

Tabela 1 - Aumento de temperatura admissível para diferentes classes de isolamento

| <b>Classe de isolamento</b>                            | <b>E</b> | <b>B</b> | <b>F</b> | <b>H</b> |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Temperatura ambiente                                   | 40°C     | 40°C     | 40°C     | 40°C     |
| Pico admissível de temperatura                         | 75°C     | 80°C     | 105°C    | 125°C    |
| Margem de segurança (ponto mais quente do enrolamento) | 5°C      | 10°C     | 10°C     | 15°C     |
| Temperatura máxima admissível                          | 120°C    | 130°C    | 155°C    | 180°C    |

Fonte: Adaptado de Kriel, Joubert e Marais (2013).

Problemas associados a harmônicos também devem ser verificados e tratados. Normalmente, associados ao inversor, existem filtros que são utilizados para reduzir esses efeitos (WEG, 2010; BOLDEA, 2008), os harmônicos são correntes e tensões inseridas na rede elétrica por frequências não lineares geradas pelo inversor de frequência (MAHESWARAN et al; 2012) e podem provocar danos a equipamentos ligados a mesma rede elétrica.

## 2.5.2 Tipos de inversores de frequência

Os inversores de frequência possuem basicamente dois modos de controle eletrônico, o escalar e o vetorial.

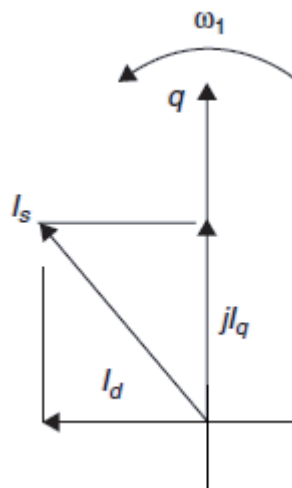
O modo escalar apresenta respostas mais lentas a variação de velocidade além de não possuírem alta precisão (PAIXÃO, 2009). Este tipo de controle busca manter a relação entre tensão e frequência constante (WEG, 2010). O modo de controle vetorial utiliza-se de equações matemáticas resolvidas em tempo real pelo inversor com o objetivo de controlar a corrente para o motor a partir da decomposição da mesma em dois vetores: um responsável pela magnetização do enrolamento do estator e outro responsável pelo fluxo de torque do

motor; assim sendo o inversor tem um controle preciso do torque e velocidade do motor podendo inclusive haver controles independentes (WEG, 2010).

O controle escalar é suficiente para a maioria das aplicações industriais (BOLDEA, 2008), além de ter um custo muito menor quando comparado ao controle vetorial utilizado quando se precisa maior precisão da rotação e torque da máquina.

Boldea (2008) dividiu ainda o controle vetorial em três modos distintos, “*field oriented*” (FOC), “*direct torque and flux*” (DTFC) e “*constant power speed range*” (CPSR). Em síntese o controle FOC decompõe o vetor fluxo ( $I_d$ ) e o vetor torque ou corrente ( $I_q$ ) como exemplificado na Figura 18. A partir daí calcula os novos valores para os parâmetros desejados, o controle DTFC é derivado do FOC, no entanto avança para vetores espaciais além dos vetores fluxo e corrente adicionando vetores para compensar a ondulação de corrente e/ou auxiliar no controle do torque.

Figura 18 - Decomposição de fluxo e torque



Fonte: Adaptado de Boldea (2008).

Sobre o controle CPSR, Boldea (2008) afirmou que este é utilizado para acionamento de máquinas especiais onde a queda do torque implica em manutenção da potência mecânica. Nestes casos o controle do torque deve ser mais preciso e possuir uma confiabilidade maior, o modal de análise é o mesmo para qualquer controle vetorial, no entanto, o “*Hard Drive*” do inversor trata as componentes de corrente de forma especial com o objetivo de obter o máximo fluxo de torque para uma determinada velocidade.

Existem outras classificações e estas variam de autor para autor, Mohan, Undeland e Robbins (2003) classificaram os inversores como PWM-SVI (*Pulse Width Modulated Voltage*

*Source Inverter*), *square-wave VSI (Square Wave Voltage Source Inverter)* e *CSI (Current Source Inverter)*. Estas classificações tendem a evoluir a medida que a tecnologia de controle eletrônico também evolui, a variedade de maneiras de controle é bastante ampla o que também dificulta a uniformização de classificações.

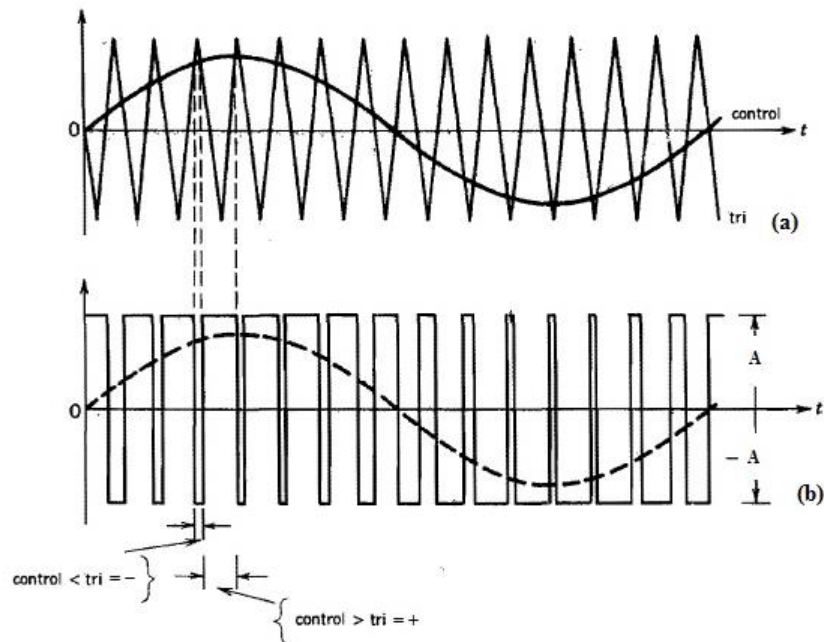
### **2.5.3 Inversores de frequência PWM**

Conforme já discutido em 2.5.1, inversores PWM ou “*Pulse Width Modulated*” ou ainda “*Largura de Pulso Modulado*”, são os tipos construtivos mais comuns em inversores de frequência. Um inversor PWM controla tanto a frequência como a tensão de saída (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Para obter uma onda senoidal de saída com frequência controlada o inversor faz uma sobreposição de duas outras ondas, uma triangular e outra senoidal. A onda senoidal se comporta de forma semelhante com o que é desejado para a onda de saída do inversor, por isso pode ser também chamada onda de controle e é obtida a partir de um sinal parametrizado pelas necessidades de um determinado processo. A onda de controle é comparada com uma onda triangular de frequência constante que representa a frequência de comutação do inversor e possui amplitude e frequência normalmente constantes.

Através da superposição das ondas senoidal e triangular é gerada uma onda digital pulsada. Se a onda senoidal (de controle) tiver um valor absoluto maior que a triangular o pulso terá uma amplitude definida e valor positivo, por outro lado se a onda senoidal tiver valor absoluto menor que a triangular o pulso de saída terá valor negativo e igual amplitude, como pode ser visto na Figura 19.



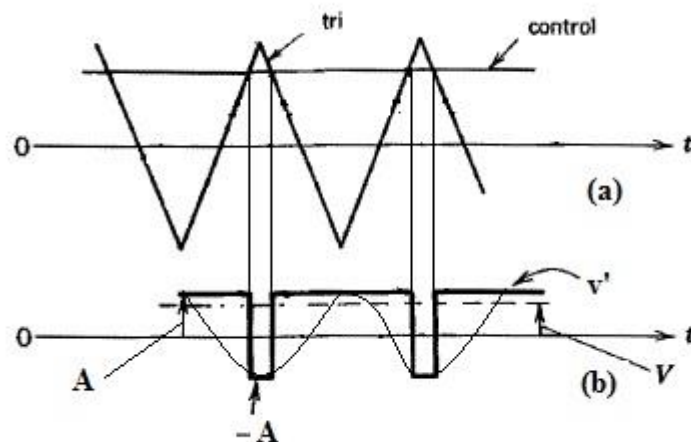
Figura 19 - Superposição de ondas em um sistema PWM



Fonte: Adaptado de Mohan, Undeland e Robbins (2003, p. 204).

Percebe-se que o comportamento da onda de saída vista na Figura 19b é semelhante ao comportamento da onda senoidal de controle (control) vista na Figura 19a. Na maioria dos sistemas de controle, no entanto, o sinal de entrada não varia com uma frequência elevada, este varia muito pouco com o decorrer do tempo ou em alguns casos pode até ser constante, com isto o valor médio da onda de saída ( $V$ ) que pode ser visto na Figura 20, tende a ser também constante, o comportamento da onda de saída ( $v'$ ) será neste caso também senoidal.

Figura 20 - Onda de saída controlada com sinal de controle constante



Fonte: Adaptado de Mohan, Undeland e Robbins (2003, p. 205).

A amplitude e frequência da onda de saída serão dependentes das ondas de controle e triangular. Em sistemas trifásicos este processo ocorre três vezes, sendo uma para cada fase, da mesma forma que a onda de entrada, a saída terá três ondas defasadas em  $120^\circ$  e controladas a partir de um sinal de entrada.

### 3 PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO DE GLP DO TEMADRE

Em Madre de Deus, município brasileiro do estado da Bahia, está situado o Terminal Almirante Alves Câmara (TEMADRE), propriedade da Petrobras e operado pela Petrobras Transporte S.A. (TRANSPETRO). O terminal é subdividido em quatro grandes parques, o MIRIM, o SUAPE, o Parque Maria Quitéria (SEGAS) e o Terminal de Regaseificação da Bahia (TRBA)<sup>4</sup>.

O SEGAS, foco do estudo, opera com Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), recebendo da refinaria Landulpho Alves (RLAM) ou de navios tanque, GLP na forma pressurizada ou refrigerada e armazenando este gás em tanques ou esferas para posterior entrega a navio, a malha de dutos ou de volta para a própria refinaria<sup>4</sup>.

Ambas as formas de armazenagem visam manter o GLP no seu estado líquido para otimizar o espaço ocupado com o armazenamento do mesmo, ou seja, armazenar a maior quantidade possível no menor espaço possível.

De acordo com a lei dos gases quando se pressuriza as moléculas de um gás elas tendem a permanecer mais próximas e a depender do gás e do nível de pressão atinge-se o estado líquido. Ainda de acordo com a mesma lei com o rebaixamento da temperatura as moléculas perdem energia e tendem a se aproximar provocando o mesmo efeito descrito anteriormente, esta lei é utilizada para balizar a teoria de armazenamento de gases.

O SEGAS possui uma planta capaz de refrigerar o GLP pressurizado contido nas esferas e armazená-lo em tanques com baixa pressão de operação, com isso pode-se armazenar uma quantidade muito maior de GLP, já que este tanque não requer a robustez construtiva para suportar as altas pressões necessárias para manter o GLP líquido, sendo assim possui maior capacidade de armazenamento que as esferas.

Para que o GLP reduza e mantenha sua temperatura do patamar de temperatura ambiente para, em média  $-25^{\circ}\text{C}$  que é a temperatura de armazenamento nos tanques<sup>5</sup>, uma série de compressores e trocadores de calor são utilizados e a água salgada é um dos fluidos direcionados para a troca térmica, que se realiza em trocadores do tipo casco-tubo.

O GLP refrigerado armazenado no tanque tende a ganhar energia do ambiente e se vaporizar o que provoca o aumento da pressão interna. Para controle desta, existem dois

---

<sup>4</sup> Retirado do Manual de Operação do T.A. Madre de Deus. Documento Interno do Sistema Petrobras. MO-3TP-00005-0

<sup>5</sup> Informação obtida a partir de entrevistas com Kenji Katayose, Técnico de Operação Senior da Petrobras com 30 anos de experiência na planta de GLP do SEGAS. (kenjikat@petrobras.com.br).

subsistemas conhecidos como *Flash*<sup>6</sup> e *Boill Off* que promovem a reliquefação deste vapor a partir de compressores, trocadores de calor e válvulas de expansão<sup>4</sup>.

Bombas de água salgada fornecem fluido de refrigeração para alguns dos trocadores do SEGAS, estas possuem códigos de identificação internos sendo estes os seguintes: B-0222B, B-0225B, B-0225C, as bombas têm a finalidade de suprir a água de refrigeração dos trocadores de calor tipo casco-tubo de processo da área de refrigeração e tancagem de GLP refrigerado<sup>4</sup>.

Basicamente existem seis trocadores de calor entre água salgada e GLP e dois trocadores entre água salgada e água doce.

Tabela 2 - Trocadores de calor com água salgada do SEGAS

| Característica | EA-108                 | EA-109 | EA-110                   | EA-112                   | EA-105                  | EA-115A/B    | EA-116                 |
|----------------|------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|------------------------|
| Sistema        | <i>Boill-Off</i>       |        |                          | <i>Flash</i>             | Refrigeração            | Resfriamento | Regeneração            |
| Função         | Condensador            |        |                          |                          |                         | Resfriador   | Resfriador             |
| Tubo           | Água Salgada           |        |                          |                          |                         |              |                        |
| Pressão        | 4 Kgf/cm <sup>2</sup>  |        |                          |                          |                         |              |                        |
| Temperatura    | 65°C                   |        |                          |                          |                         |              | 35°C                   |
| Casco          | GLP                    |        |                          |                          |                         | Água doce    | GLP                    |
| Pressão        | 16 Kgf/cm <sup>2</sup> |        | 24,2 Kgf/cm <sup>2</sup> | 22,4 Kgf/cm <sup>2</sup> | 3,5 Kgf/cm <sup>2</sup> |              | 19,4 f/cm <sup>2</sup> |
| Temperatura    | 107 °C                 |        | 150 °C                   | 107 °C                   | AMB                     |              | AMB                    |

Fonte: MO-3TP-00005<sup>4</sup>

O trocador EA-112 faz parte do sistema de *Flash* que têm a finalidade de retirar GLP do tanque na forma gasosa e devolvê-lo na forma líquida com o objetivo de controlar a pressão interna do mesmo. EA-108, EA-109 e EA-110, são os três trocadores de *Boill Off*, que têm a mesma finalidade do *Flash* porém numa proporção muito menor para situações de menor vaporização, como a tancagem sem operações de refrigeração ou recirculação. O trocador EA-105 faz parte do processo auxiliar que fornece fluido refrigerante para a refrigeração. Os trocadores EA-115-A e o EA-115-B têm a função de rebaixar a temperatura da água utilizada para arrefecimento interno dos compressores da planta. O EA-116 arrefece o

<sup>6</sup> Despressurização abrupta de um líquido. Neste caso é apenas uma referência operacional ao processo do SEGAS.

GLP que vêm do forno após o aquecimento deste para o processo de regeneração das torres de secagem.

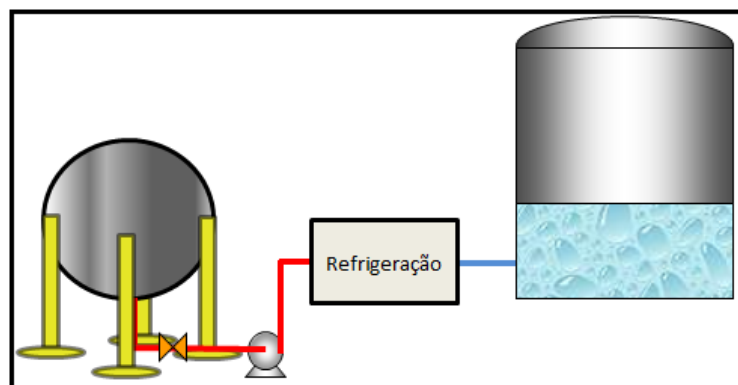
Por último tem-se o P-0301 que não está exemplificado na Tabela 2, devido ao fato de não ser um trocador casco-tubo e sim por serpentina. Sua finalidade é “aquecer” o GLP dos tanques quando há necessidade de transferência de GLP dos tanques refrigerados para recebedores que não são aptos a receber o produto neste modal de armazenamento<sup>4</sup>.

### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Como exemplo da possibilidade de eficiência energética de um sistema com demanda variável; utilizaremos o sistema de armazenamento refrigerado de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) do Parque Maria Quitéria (SEGAS).

O referido processo utiliza água do mar como fluido de arrefecimento para uma série de trocadores inseridos no processo de refrigeração e armazenagem. A operação consiste em, bombear GLP armazenado em esferas a fim de mudar o molde de armazenamento deste de pressurizado para refrigerado, com o objetivo de aumentar a eficiência de armazenamento de gás liquefeito. Para isso é necessário refrigerar o gás a fim de atingir as propriedades adequadas para seu armazenamento em tanques refrigerados.

Figura 21 - Esquema básico de refrigeração de GLP



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

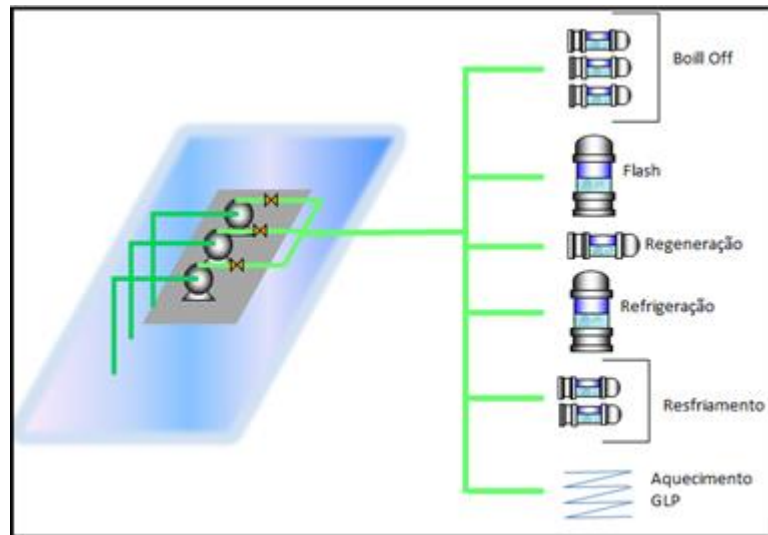
O SEGAS pode armazenar GLP de duas maneiras; pressurizado em esferas que mantém o produto liquefeito<sup>7</sup> em pressões acima da ambiente, ou refrigerado em temperaturas abaixo da ambiente. O SEGAS recebe o produto da refinaria sempre pressurizado e precisa refrigera-lo através de trocadores de calor e processos de expansão para envio aos tanques

<sup>7</sup> A 25°C o GLP encontra-se no estado gasoso

refrigerados que o armazenam a temperaturas criogênicas. Para a refrigeração o próprio GLP é utilizado como gás refrigerante em um processo de compressão e expansão deste com troca de calor.

Para que haja a esperada redução de temperatura do patamar de temperatura ambiente até  $-25^{\circ}\text{C}$  que é a temperatura média de armazenamento nos tanques<sup>5</sup>, e para manter o gás a esta temperatura durante um determinado tempo, uma série de compressores e trocadores de calor são utilizados e a água salgada é um dos fluidos para a troca térmica que se realiza em trocadores do tipo casco-tubo<sup>5</sup>.

Figura 22 - Trocadores do SEGAS que utilizam água salgada



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Basicamente cinco processos são necessários para a armazenagem refrigerada: i) a própria refrigeração para o recebimento do produto; ii) o *Flash* e *Boill-Off*, para manutenção da pressão interna dos tanques; iii) o resfriamento de água para manter os compressores do sistema operacionais; iv) a regeneração para assegurar a capacidade de secagem do GLP que segue para os tanques; v) aquecimento para retirar produto refrigerado e entrega-lo a recebedores que não estão aptos a este tipo de armazenagem.

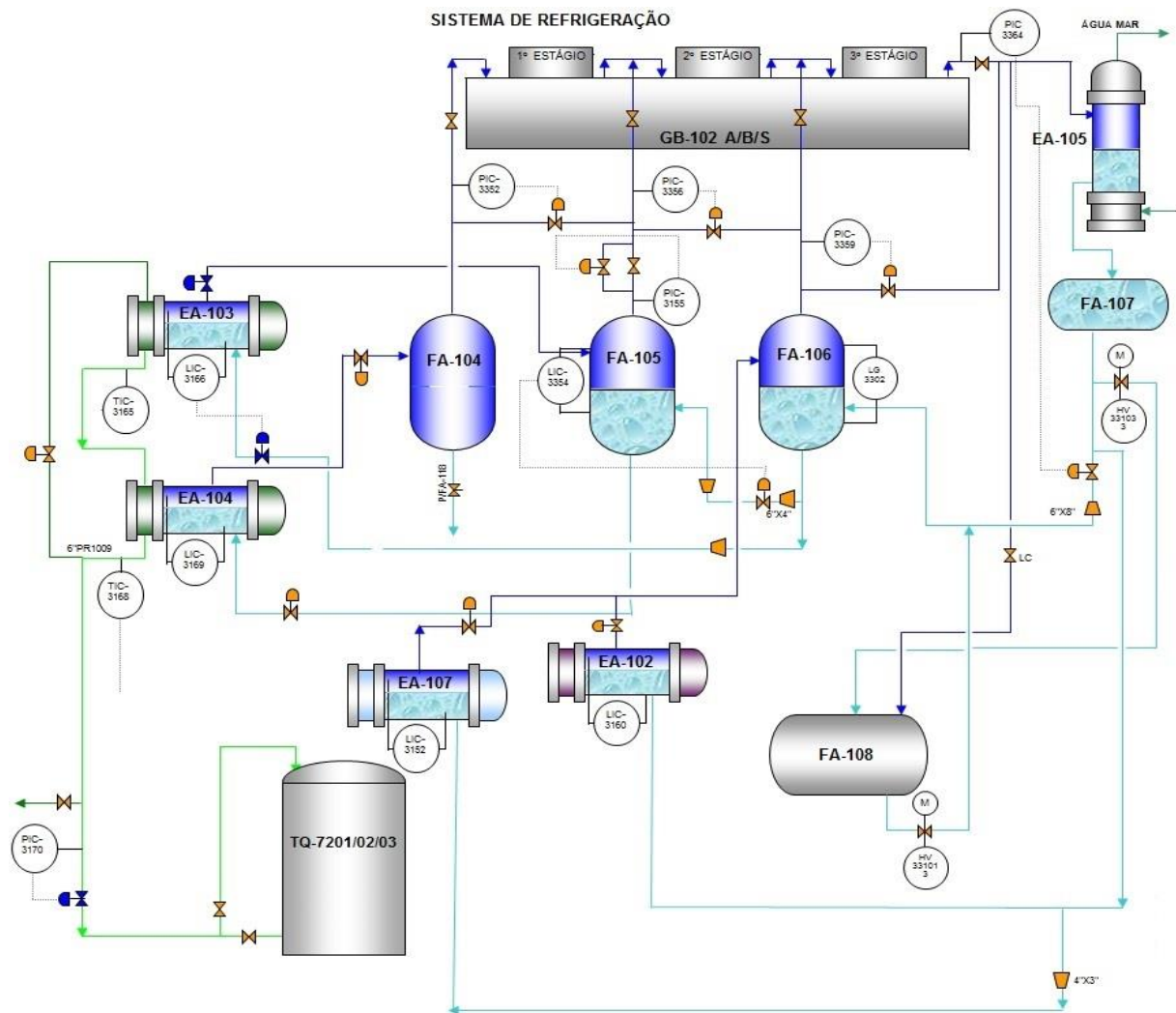
### 3.1.1 Refrigeração

Todo processo de refrigeração requer um fluido refrigerante, no caso do SEGAS o refrigerante utilizado é o próprio GLP. Com o processo de troca térmica e a absorção de

energia, o refrigerante passa por mudança de fase dentro dos trocadores, passando do estado líquido para o gasoso.

Sendo o processo em circuito fechado, faz-se necessário liquefazer o refrigerante para que novamente troque energia e refrigere o fluxo de gás antes da sua entrada nos tanques. Este processo dispõe de três compressores de três estágios cada um, cada estágio succiona o fluido refrigerante na forma gasosa de vasos intermediários diretamente ligados ao topo dos trocadores de calor (Figura 23).

Figura 23 - Processo de refrigeração



Fonte: Manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>

No vaso de sucção do primeiro estágio (FA-104) não é admitido pelo processo presença de líquido enquanto nos outros vasos de sucção do segundo e terceiro estágios (FA-105 e FA-106 respectivamente) há um equilíbrio entre a fase vapor e líquida. O terceiro

estágio descarrega para um trocador com água salgada (EA-105) que rebaixa a temperatura do refrigerante após esta ter-se elevado consideravelmente devido ao processo de compressão.

Do EA-105 o refrigerante segue para o vaso acumulador FA-107 de onde por uma válvula de expansão, tem sua temperatura reduzida aos níveis requeridos pelo processo seguindo então para os trocadores da refrigeração de GLP (EA-107) e de regeneração das torres de secagem (EA-102).

A vazão máxima de refrigeração de GLP das esferas até os tanques refrigerados é de 150 m<sup>3</sup>/h<sup>8</sup>, no entanto, esta normalmente atinge patamares inferiores em virtude do controle da pressão interna dos tanques que tende a aumentar pelo aquecimento provocado no recebimento do produto.

Como um exemplo prático a operação de refrigeração ocorrida em 18/05/2016 que será discutida em 4.4.2 atingiu a vazão média de 108 m<sup>3</sup>/h transferindo o volume de 649 m<sup>3</sup> da esfera para o tanque.

Percebe-se neste contexto a presença do trocador EA-105 que utiliza a água salgada como fluido de menor temperatura, este trocador é utilizado de acordo com a demanda, ou seja, sua válvula de admissão de água é aberta momentos antes de se iniciar o processo de refrigeração e requer que seja utilizada a bomba B-0225B em paralelo com a B-0222B ou apenas a B-0225C (ver 3.3.2).

O trocador foi projetado para atingir pressões de 22,5 Kgf/cm<sup>2</sup> no casco e 4,0 Kgf/cm<sup>2</sup> no tubo, a água salgada passa pelos tubos podendo atingir temperatura máxima de 65°C enquanto o GLP arrefece no casco que pode atingir temperaturas de até 107°C (Tabela 2).

### **3.1.2 *Flash e Boill-Off***

Após passar pelo processo de refrigeração e secagem o GLP chega aos tanques refrigerados a uma temperatura média de aproximadamente -25°C<sup>5</sup>. É de se esperar que com o tempo o GLP ganhe energia do ambiente e comece a se vaporizar, isso pode ocasionar um problema, visto que os tanques refrigerados foram projetados para suportar pressões de no máximo 0,137 Kgf/cm<sup>2</sup> <sup>5</sup> quando sua válvula de segurança abre para a atmosfera, portanto faz-se necessário a retirada do vapor para manter a pressão interna do tanque dentro dos patamares de projeto.

---

<sup>8</sup> Procedimento de Execução PE-5TP-00434 – Refrigeração de GLP/Propeno – TAMDEUS/OPGLP. Documento interno do sistema Petrobras



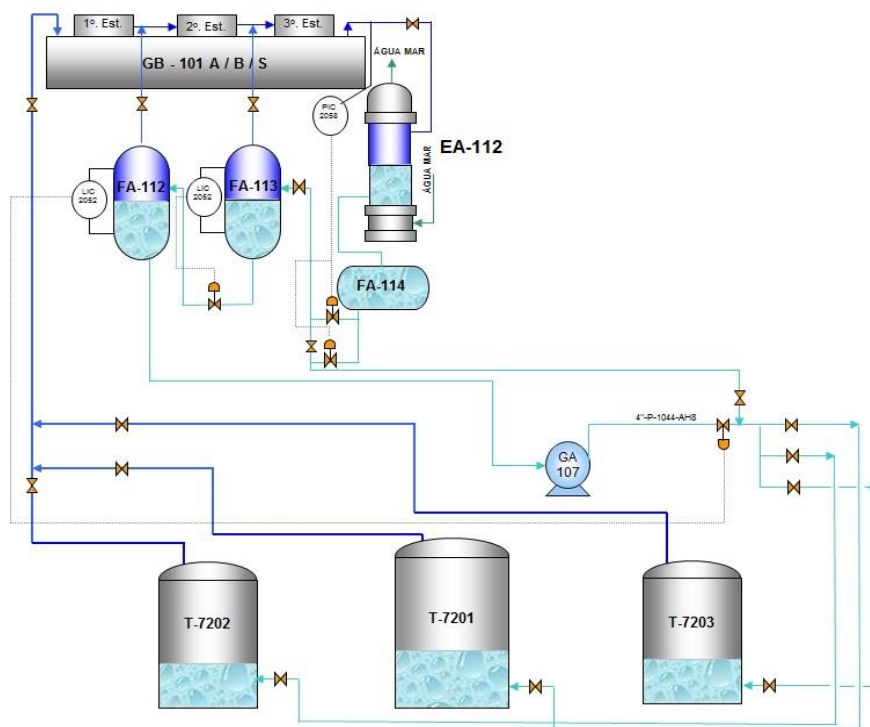
Para este fim, existem dois sistemas auxiliares, o processo de “*Boill-Off*” e o processo de “*Flash*”.

Os dois processos se assemelham no objetivo e funcionalidades, pois ambos succionam o vapor do teto dos tanques e o liquefazem enviando de volta líquido para o fundo, sendo que a grande diferença entre eles está na capacidade de reliquefação.

O *Boill-Off* tem uma capacidade muito menor e é utilizado para situações de baixa vaporização (dias frios, manutenção da pressão interna quando sem operação), enquanto o *Flash* tem um poder de sucção e reliquefação muito maior, sendo que é utilizado em situações de grande vaporização do tanque (operações de recirculação de GLP e/ou refrigeração).

O sistema de *Flash* possui três compressores o GB-101A, GB-101B e GB-101S e apenas um trocador com água salgada o EA-112 enquanto o *Boill-Off* possui três compressores GB-103, GB-104 e GB-105 e três trocadores um pra cada compressor EA-108, EA-109 e EA-110.

Figura 24 - Processo de FLASH



Fonte: Manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>.

No sistema de *Flash*, como já foi dito, há a sucção dos vapores por meio do compressor do teto dos tanques refrigerados. A partir daí o GLP é comprimido em três estágios sendo que entre estes existem vasos interestágios, FA-112 e FA-113.

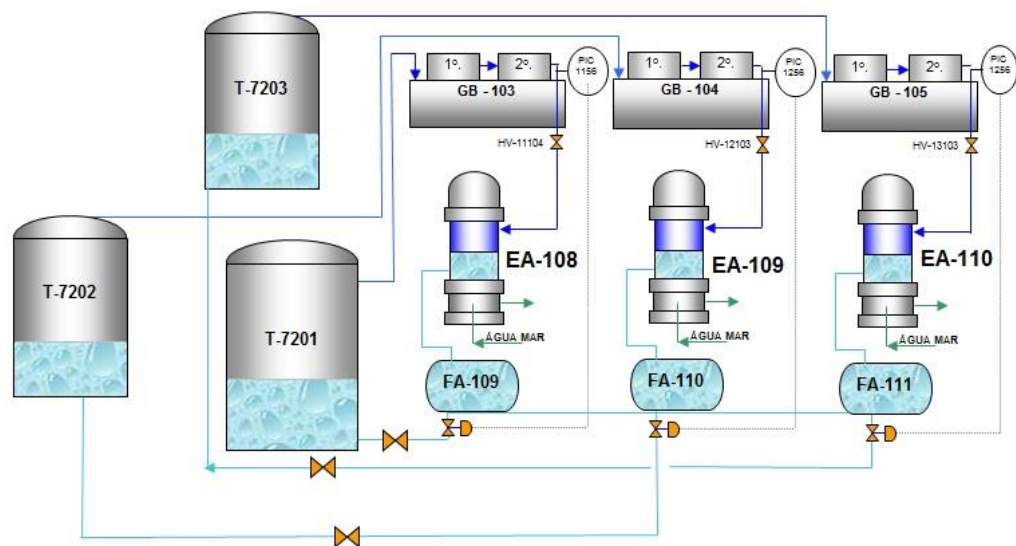
O FA-112 envia de volta o GLP líquido para o fundo do tanque através da bomba GA-107 e alimenta, também, o primeiro interestágio com vapor de GLP; o FA-113 recebe o GLP vindo do FA-114. Este recebe o condensado após a saída do compressor e troca térmica no trocador EA-112 com água salgada. Ocorre após o FA-114 a expansão do líquido com o objetivo de reduzir a temperatura por efeito Joule-Thompson<sup>9</sup>, o FA-113 supre de líquido o FA-112 e de vapor o segundo interestágio do compressor.

No sistema de *Flash* percebe-se mais um trocador de suma importância para a dissertação, o EA-112 que recebe a descarga do terceiro estágio dos compressores de *Flash* e faz o rebaixamento desta temperatura de em média 86°C para 29°C<sup>10</sup>.

O EA-112 é também utilizado por demanda, no entanto a válvula de entrada de água salgada para o trocador fica alinhada permanentemente, pois sempre há a possibilidade de um pico de pressão nos tanques e necessidade de partida rápida do sistema para o alívio desta pressão, esta sistemática será melhor descrita em 3.3.2.

O sistema de *Boill-Off* tem a mesma finalidade do *Flash* porém com uma vazão menor. O esquema simplificado está demonstrado na Figura 25.

Figura 25 - Processo de *Boill-Off*



Fonte: Manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>

Os compressores de *Boill-Off* assim como os de *Flash* succionam GLP vaporizado do topo dos tanques a fim de retirar vapor para controle de pressão, possuem dois estágios de

<sup>9</sup> Efeito que descreve a redução de temperatura que um gás sofre após sofrer expansão em uma válvula de estrangulamento.

<sup>10</sup> Valores obtidos para a operação do dia 09/09/2016 (APÊNDICE C)

compressão, porém sem sucção interestágio e descarregam direto em um trocador com água do mar para reduzir a temperatura de aproximadamente 100°C para 36°C<sup>11</sup>, do trocador segue direto para um vaso acumulador e daí para uma válvula de expansão e em seguida de volta para o tanque.

Existem três trocadores com água salgada no processo de *Boill-Off*, um para cada compressor e os mesmos ficam alinhados recebendo água o tempo inteiro para um pronto atendimento em caso de necessidade de partida do sistema (ver item 3.3.2).

### **3.1.3 Resfriamento de água doce**

Os compressores do SEGAS apresentam elevadas temperaturas nos cilindros e partes metálicas do equipamento devido ao processo de compressão do fluido, ressalta-se ainda que, temos na natureza dos compressores alternativos, o atrito entre partes fixas e móveis que também favorecem o aumento da temperatura das partes metálicas e, por conseguinte, do fluido de trabalho da máquina.

Associando esses dois efeitos é percebido nos compressores do SEGAS um aumento considerável entre a temperatura de entrada e saída do fluido comprimido que justifica a necessidade de trocadores de calor; este aumento de temperatura é também percebido no equipamento e pode provocar perda de eficiência caso não seja tomada nenhuma medida para redução da temperatura das partes metálicas (DUTRA, 2008).

---

<sup>11</sup> Média das operações percebidas entre 18/05/16 e 09/09/16 (APÊNDICE C)

Figura 26 - Aumento de temperatura no cilindro do GB-104



Fonte: Fotografia retirada pelo autor desta dissertação (2016).

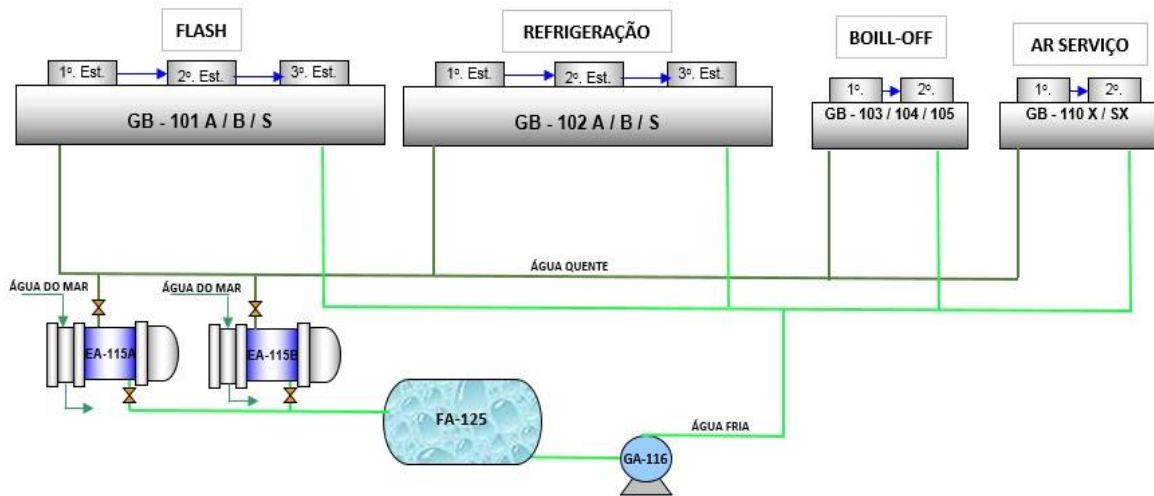
Devido a esta necessidade o SEGAS possui um sistema de arrefecimento das partes internas dos compressores da planta, arrefecimento este realizado com água doce num circuito fechado.

A água de arrefecimento é forçada para dutos internos à carcaça do compressor, com isso a água aquece devido à troca térmica e retorna para o circuito fechado enquanto o compressor tem sua temperatura reduzida.

Ao retornar, a água aquecida segue para os trocadores de calor EA-115A ou EA-115B, neles há a troca térmica com a água do mar que vem das bombas de água salgada; após o rebaixamento da temperatura a água doce segue para um vaso pulmão (FA-125) de onde é succionada e bombeada através das bombas GA-116A, GA-116B ou GA-116S, para os compressores promovendo uma nova troca térmica e fechando assim o ciclo de água doce.

As bombas GA-116 operam sempre duas em paralelo e uma em espera.

Figura 27 - Resfriamento de água doce



Fonte: Adaptado do manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>

Os trocadores EA-115 A e B são montados em paralelo, sendo que sempre um deles estará alinhado e o outro na reserva, independente da quantidade de compressores em operação. O sistema possui também um tanque de modo a controlar o volume de água doce em circulação nos compressores e três bombas, que operam duas de cada vez em paralelo de modo a controlar o volume de recirculação e garantir a quantidade de água necessária para o arrefecimento.

Não há controle específico ou apurado das temperaturas de entrada e saída dos trocadores. Segundo o projeto do equipamento datado em 2002, a água doce deveria adentrar pelo casco a 55,1°C e deixá-lo a 41,2°C, enquanto a água do mar deveria entrar pelos tubos à 29°C e sair com um incremento de 12,9°C na sua temperatura, no entanto, a temperatura efetiva de entrada e saída do trocador dependerá de quantos compressores estiverem em operação no momento, visto que com o compressor parado não há aquecimento do fluxo de água para este.

Isto torna o processo extremamente variável sendo a sua necessidade de água salgada para os trocadores EA-115A ou EA-115B altamente variável e diretamente dependente da quantidade de compressores em operação.

### 3.1.4 Aquecimento de GLP

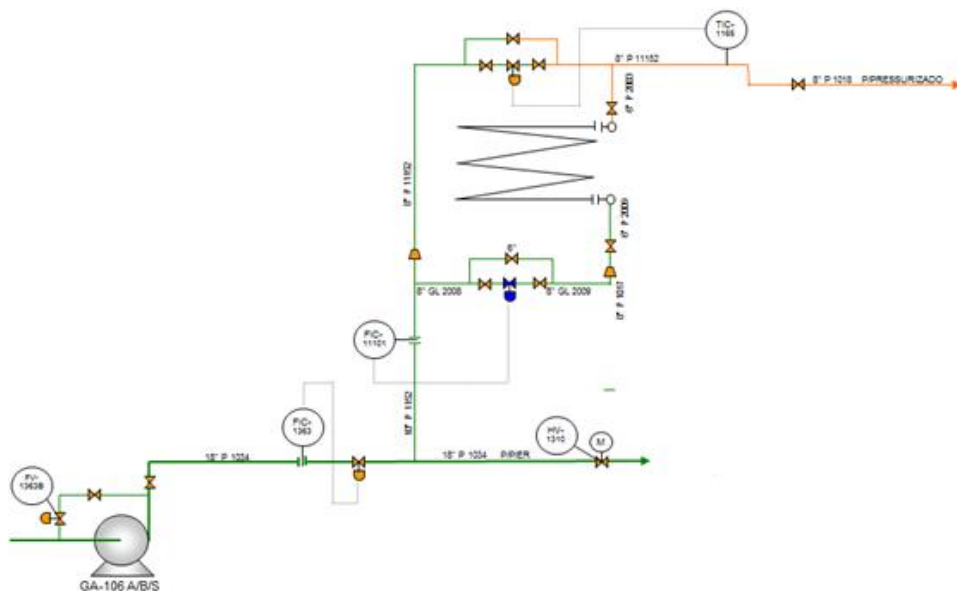
O processo de aquecimento de GLP dá-se num fluxo operacional dos tanques refrigerados para recebedores pressurizados quando é necessário atender a uma demanda de

GLP pressurizado e a refinaria Landulfo Alves não tem possibilidade de fornecer ou não há produto suficiente nas esferas do SEGAS.

Este processo dá-se retirando o fluido refrigerado dos tanques através de bombas e fazendo o mesmo passar por um dos dois trocadores de calor com água salgada do tipo serpentina existentes no SEGAS o P-0301A ou B; neste o GLP refrigerado passa pelos tubos e a água é bombeada e forçada a promover um dilúvio sobre a serpentina do mesmo de modo que o GLP possa sair do trocador e ser encaminhado para as esferas pressurizadas em temperatura adequada.

O sistema foi projetado para ser completamente automático se operado conforme foi concebido (Figura 28). O GLP refrigerado a aproximadamente  $-25^{\circ}\text{C}$  seria succionado pelas bombas GA-106 A, B ou S e encaminhado para o P-0301A ou B através da linha de 10" P-1152. A partir daí o GLP passaria por uma válvula controladora de fluxo controlada pelo FIC-11101, pelas serpentinas e pelo controle de temperatura através do TIC-1165, que injetaria GLP refrigerado no fluxo caso o mesmo saísse do P-0301 A/B com temperatura superior ao programado pela operação, a água salgada, de acordo com esse projeto, seria alinhada através de uma válvula gaveta *on/off* e deveria ser alinhada completamente até o final da operação.

Figura 28 - Esquema de automação do P-0301 A/B



Fonte: Manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>

No entanto devido a fatores diversos o sistema não vem operando desta forma.

De acordo com o procedimento operacional de aquecimento de GLP<sup>12</sup>, a temperatura do fluxo refrigerado deve ser controlada manualmente por uma válvula borboleta instalada em série com a válvula gaveta supracitada de maneira manual, ou seja, deve ser verificada a temperatura no TIC-1165 de saída do gás e ajustada a vazão de água salgada para a temperatura requerida pela operação.

### 3.1.5 Regeneração

O processo de regeneração é necessário quando as torres de secagem FF-101A ou FF-101B não são mais capazes de absorver a umidade em suspensão contida no fluxo de produto.

No processo de refrigeração, o GLP parte das esferas pressurizadas à temperatura ambiente em direção aos tanques refrigerados que o armazenam a temperaturas de aproximadamente -25°C. Toda a umidade contida deve ser retirada para que a mesma não se transforme em gelo com a redução da temperatura e comprometa por sua vez a operação das válvulas de controle existentes na planta de refrigeração.

A retirada desta umidade dá-se forçando o fluxo a passar por uma das duas torres de secagem existentes na planta a FF-101A ou FF-101B. Estas torres possuem leitos adsorventes onde a umidade contida no GLP é retida enquanto o gás seco segue para o início do processo de refrigeração.

Com o passar das operações as torres perdem sua capacidade de secagem devido à saturação do leito adsorvente em água, neste momento as mesmas precisam ser regeneradas.

Esta condição, na prática, é definida pelo volume de gás refrigerado, uma vez que o analisador de umidade, que seria o instrumento projetado para definir a necessidade de regeneração, encontra-se danificado e inoperante atualmente. De acordo com PE-5TP-00434<sup>13</sup>, esta regeneração deve ser realizada a cada 14.000m<sup>3</sup>.

O processo de regeneração pode ser visualizado resumidamente na Figura 29, a retirada da umidade em excesso das torres é realizada por evaporação da água e aglomeração desta em forma gasosa a um fluxo forçado de GLP em contracorrente ao fluxo natural de

---

<sup>12</sup> Procedimento de Execução PE-5TP-00435 – Movimentação de Produtos – TAMDEUS/OPGLP. Documento interno do sistema Petrobras

<sup>13</sup> Procedimento de Execução PE-5TP-00434 – Refrigeração de GLP/Propeno – TAMDEUS/OPGLP. Documento interno do sistema Petrobras

secagem. Para isso parte do fluxo seco é retirado da outra torre em operação de refrigeração e direcionado para um forno (BA-102) que o aquece até aproximadamente 245°C<sup>14</sup>.

O GLP seco e aquecido segue para o topo da torre que está em processo de regeneração com vazão entre 5.000 e 6.000 Kg/h<sup>13</sup>, devido a sua temperatura a água que está associada ao leito adsorvente evapora e se associa ao fluxo até o fundo da torre.

Após sua passagem pelo leito saturado em água o gás já úmido e ainda quente segue para o trocador com água salgada EA-116 onde sua temperatura é abaixada até aproximadamente 65°C<sup>14</sup>, temperatura ainda alta para a precipitação da água no seu estado líquido e liquefação total, portanto um segundo trocador desta vez com GLP, é necessário o EA-102.

Ao deixar o EA-102 a água já transformada no estado líquido é coletada em um vaso acumulador FA-102, a partir deste a operação drena o excesso de água contida no gás úmido que, já liquefeito, retorna para o processo podendo ser encaminhado para a refrigeração que necessariamente deve estar em fluxo ou para as esferas pressurizadas.

A regeneração é finalizada quando todos os pontos da torre de secagem estiverem com temperatura igual ou superior a 230°C e não for mais percebida água no vaso FA-102<sup>13</sup>.

No processo de regeneração pode-se observar a presença do EA-116, outro trocador que utiliza água salgada. Como o processo de regeneração é bastante eventual, a válvula de admissão de água salgada do EA-116 é mantida permanentemente bloqueada sendo aberta somente quando da necessidade de regeneração das torres.

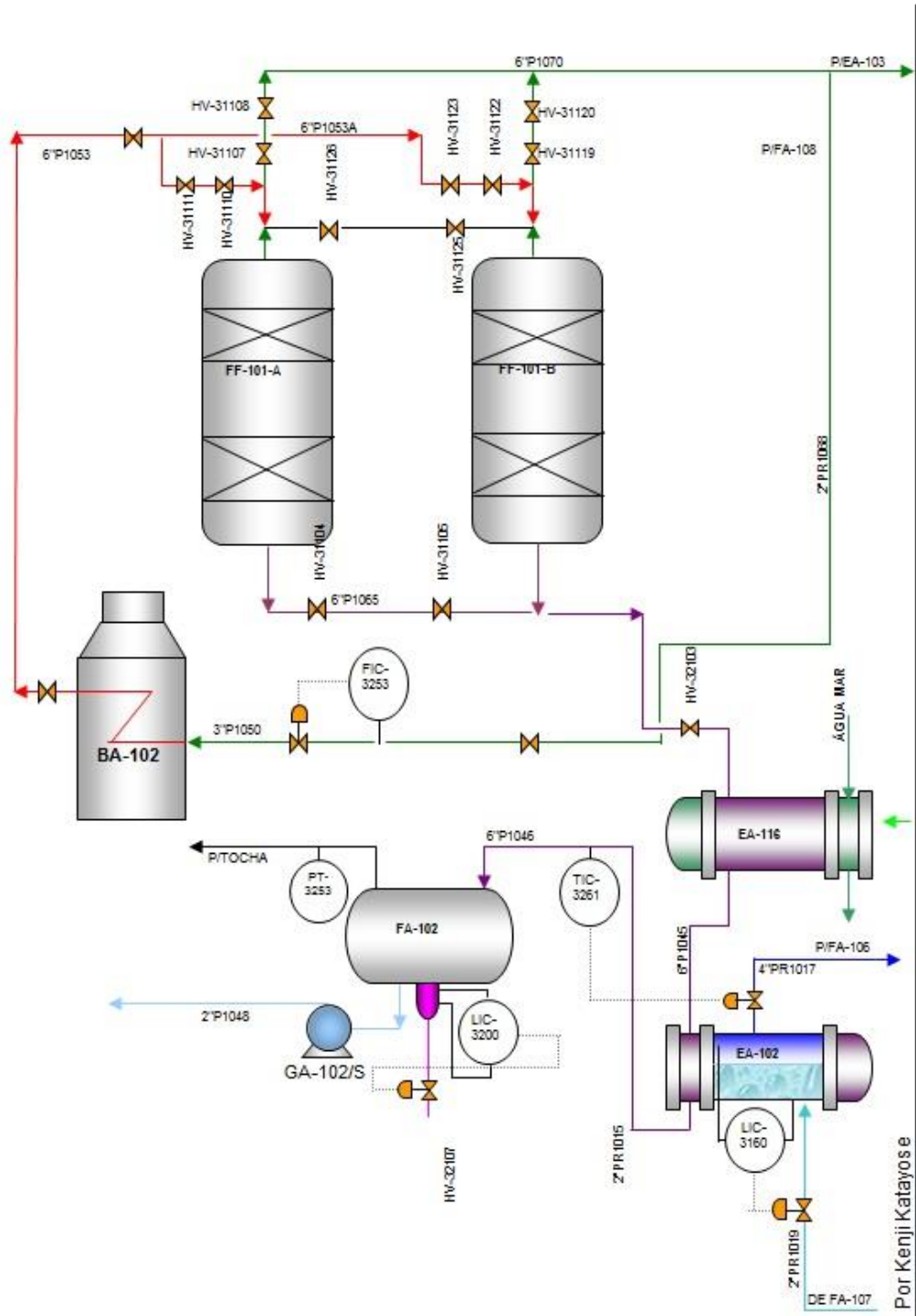
Mais uma vez percebe-se a ausência de controle apurado da vazão de água salgada para o trocador, sendo que neste tipo de operação necessariamente o trocador de refrigeração deve estar em operação, além dos trocadores de *Boill-Off* e *Flash* que normalmente permanecem com fluxo de água do mar em tempo integral.

---

<sup>14</sup> Valor obtido em entrevista com Técnico de Operação Senior, Valdeck Pedro Feliciano e com o Técnico de Operação Pleno André Luís Teles no dia 07/08/016.



Figura 29 - Processo de regeneração



Fonte: Manual criado pelo Técnico de Operações Senior Kenji Katayose<sup>5</sup>

Por Kenji Katayose

## 3.2 TROCADORES COM ÁGUA SALGADA

### 3.2.1 Sistema de controle de vazão de água salgada do GLP

A vazão dimensionada de fluido de arrefecimento em um sistema de troca térmica é função da quantidade de calor que se deseja trocar. Quando se utiliza água o sistema de bombeamento é dimensionado para atender a esta demanda, no entanto, questões de processo como já foi visto mostram que a necessidade de troca térmica, em alguns casos, é variável e, por conseguinte a vazão também o deve ser para obter-se eficiência máxima do processo.

Para o caso estudado não há controle da vazão de água para os trocadores, as válvulas de controle na entrada de cada trocador são válvulas manuais onde a operação abre e fecha completamente a entrada e saída, nos trocadores de *Flash*, *Boill-Off* e Refrigeração existe o controle automatizado de vazão a partir da descarga do compressor, no entanto, esta é funcional apenas para o GLP e tem o caráter puramente operacional a ausência de controle sobre o fluido de arrefecimento, neste caso, a água salgada, anula a possibilidade de controle visando a eficiência energética do trocador.

A única variável observada que baliza as decisões da operação sobre a água salgada é a pressão na linha de descarga das bombas no Pier Secundário (PS) que é o local de instalação das bombas no Terminal. A pressão de descarga deve ser controlada para permanecer entre 5,0 e 6,0 Kgf/cm<sup>2</sup> para garantir a eficiência do sistema<sup>15</sup>.

Parâmetros individuais por trocador estão disponíveis em alguns equipamentos, os EA-116, EA-105 e EA-112 dispõem de indicadores de pressão de água imediatamente na entrada do trocador, esta indicação, no entanto, não gera qualquer outra ação que não seja a partida da B-0225B (caso se esteja operando apenas com a B-0222B) ou da B-0225C<sup>15</sup>.

Não há medição nem estimativa da vazão de água necessária por trocador, nem da vazão total de água que entra e sai do SEGAS. O acompanhamento das temperaturas de água na entrada e saída do trocador não gera ação imediata sobre a operação, a ação dá-se com base nas temperaturas de entrada e saída do GLP apenas, a observação destas gera o controle da vazão de gás para o trocador, não gerando nenhum controle sobre a vazão de água que permanece constante em qualquer situação.

---

<sup>15</sup> Procedimento de Execução PE-5TP-01251 – Sistema de utilidades – TAMDEUS/OPGLP. Documento interno do sistema Petrobras

Existe preocupação no tocante a temperatura de água na saída de retorno para o mar devido à resolução CONAMA 430/11, o retorno da água salgada dos trocadores cai em uma canaleta e segue de volta para a baía de Todos os Santos.

### 3.2.2 Estimativa de eficiência atual dos trocadores

Como já explanado em 2.3.1 o cálculo da eficiência de um trocador de calor é bastante complicado e envolve uma série de fatores externos e internos que precisam ser levados em consideração para um cálculo preciso, quando o trocador de calor possui longa vida operacional este cálculo torna-se ainda mais difícil devido ao desconhecimento das condições internas do equipamento.

Como o objetivo principal do presente trabalho não é estimar a troca térmica dos trocadores da planta e sim otimizar esta troca no intuito de eficientizar o processo como um todo, decidiu-se desenvolver uma metodologia simplificada de cálculo de eficiência de trocadores de calor de maneira que se pudesse, senão obter as temperaturas de saída e a vazão dos fluídos de forma direta, estimar o que aconteceria em caso de alteração dessas variáveis.

Incropera e Dewitt (2003) afirmaram que a troca térmica entre os fluidos do trocador de calor pode ser estimada pela seguinte formulação:

$$q = m \cdot (h_e - h_s) \quad (10)$$

Onde:

$q$  = calor trocado dentro do trocador de calor (W);

$m$  = vazão mássica do fluido (Kg/s);

$h_e$  = entalpia de entrada (J/Kg);

$h_s$  = entalpia de saída (J/Kg).

Esta formulação reafirma a já exposta Equação 5.

Como já discutido um trocador de calor teria eficiência máxima, ou seja, 100%, caso todo o calor perdido pelo fluido quente fosse absorvido pelo fluido frio, ou seja,  $q_q = q_f$ , sendo assim podemos estimar de maneira direta e simples a eficiência do trocador como sendo:

$$\eta = \frac{q_q}{q_f} \quad (11)$$

Onde:

$q_q$ =calor trocado pelo fluido quente (W);

$q_f$ =calor trocado pelo fluido frio (W);

$\eta$ =rendimento do trocador (adimensional).

Obviamente as condições e a eficiência mudam a depender da vazão de fluidos no trocador, no entanto, para o objetivo proposto e, para se estimar a efetividade do equipamento a formulação proposta é uma boa aproximação. El-Morsi (2015) em seu trabalho de estudo da viabilidade de utilização de GLP como fluido refrigerante em geladeiras residenciais, utilizou a Equação 10 para o cálculo de troca térmica pelos dois trocadores do sistema, o evaporador e o condensador, com uma incerteza de eficiência entre 0,02 e 0,03%.

Esta metodologia de cálculo de eficiência pode ser utilizada como fator de decisão para a parada de um trocador de calor, a partir da eficiência e do fator global de troca térmica de projeto, pode-se estimar para cada trocador, o ponto crítico tolerável sem perda considerável da eficiência de maneira muito mais simples e rápida, bastando para isso o conhecimento das vazões e entalpia de entrada e saída, de cada fluido.

Este pensamento é compartilhado por Laskowski (2016) quando afirmou que as formulações clássicas como a NTU exposta em 2.3.1 são demasiadamente complexas e podem incorrer em erros de cálculo devido ao não conhecimento pleno de dados geométricos e detalhes construtivos do trocador de calor, isto, associado ao erro tolerável encontrado em comparação aos métodos (1,69-8,43%) justificaria a utilização de equações simplificadas para tomadas de decisão com objetivos operacionais.

Muitos processos modernos permitem obter esses valores de maneira direta com medição em tempo real das variáveis necessárias, vazão, temperatura e pressão, são suficientes para estimar o calor trocado por um determinado fluido e assim a efetividade do processo de troca térmica.

Na presente dissertação esta metodologia será utilizada para otimizar a vazão de água salgada para o trocador com base no que se deseja para a troca térmica dos fluidos de processo que neste caso é basicamente GLP e água salgada.

### 3.3 BOMBAS DE ÁGUA SALGADA

Estão instaladas no parque do Mirim três bombas elétricas (Figura 22) que têm a função de fornecer ao SEGAS água salgada como fluido frio para os trocadores EA-105, EA-108, EA-109, EA-110, EA-112, EA-115A/B e EA-116 e ainda fluido de aquecimento do GLP refrigerado para o P-0301<sup>15</sup>.

As três bombas (B-0222B, B-0225B, e B-0225C) são instaladas em paralelo e uma ao lado da outra em linha como pode ser visto na Figura 30, devido a isso é comum à perda de pressão por vazamento ocorrido nas válvulas de bloqueio e/ou retenção da bomba ao lado além de vazamentos no sistema como um todo; com o aumento da pressão de operação na linha de água estas perdas se amplificam (GUIMARÃES, 2008).

O aumento de pressão ocorre quando é utilizado menor volume de água do que a bomba está projetada para enviar, situação comum no caso do SEGAS. O controle de vazão não vem associado a uma mudança na capacidade da bomba, nestes casos a operação do SEGAS mantém alguns trocadores alinhados de modo a evitar aumento de pressão e desarme da bomba por sobrecorrente.

Um outro problema é a fragilidade das linhas em virtude do tempo de operação e de reparos temporários realizados no decorrer de sua vida útil; este fato não permite o aumento da pressão na linha, normalmente mantém-se o trocador EA-112 sempre alinhado a fim de manter esta variável em condições seguras.

Nas observações de campo realizadas em 07/08/2016 fechou-se todos os trocadores mantendo apenas o EA-109 alinhado, a pressão na entrada do SEGAS chegou a 7,9 Kgf/cm<sup>2</sup> quando ocorreu o furo da linha e paralisação do experimento.

Figura 30 - Bombas de água salgada



Fonte: Fotografia retirada pelo autor (2016).

O sistema em questão mantém a rotação da bomba independentemente do alinhamento ou não de água para os trocadores. Qualquer intervenção na planta, tais como, abertura, fechamento ou ajuste de vazão de água salgada para os trocadores não é percebida pelo motor que continua em sua rotação nominal e com um consumo energético não condizente com a necessidade momentânea do processo, ocasionando com isso, como já mencionado em 2.2.1, desperdício de energia e problemas em longo prazo em virtude do aumento de pressão.

Utilizando-se de variador de velocidade que controle a rotação do eixo do conjunto moto-bomba para a necessidade real de vazão do equipamento a economia de energia pode ser relevante, isto levando-se em conta que a bomba opera 24 horas por dia e que, no caso em estudo, trata-se de motores de no mínimo 300 CV (ver item 3.3.1) pode-se vislumbrar um campo relevante de investimentos.

Associado ao caso específico da TRANSPETRO e da normalidade de utilização de trocadores de calor na indústria, a presente dissertação deverá servir de balizamento para

novos projetos onde se tem demanda variável de fluido de refrigeração em sistemas de bombeamento.

### **3.3.1 Dados de projeto motores e bombas**

Para o levantamento de dados uma ampla pesquisa no arquivo técnico do TEMADRE e no arquivo permanente da manutenção do terminal foi realizada focando nos dados elétricos e mecânicos que serão utilizados para o cálculo do consumo de energia elétrica e da eficiência obtida e requerida.

Inicialmente pensava-se que alguns dados não seriam encontrados devido ao tempo de operação dos motores estudados e a dificuldade de acesso aos documentos; no entanto, toda a documentação estava organizada por TAG<sup>16</sup>.

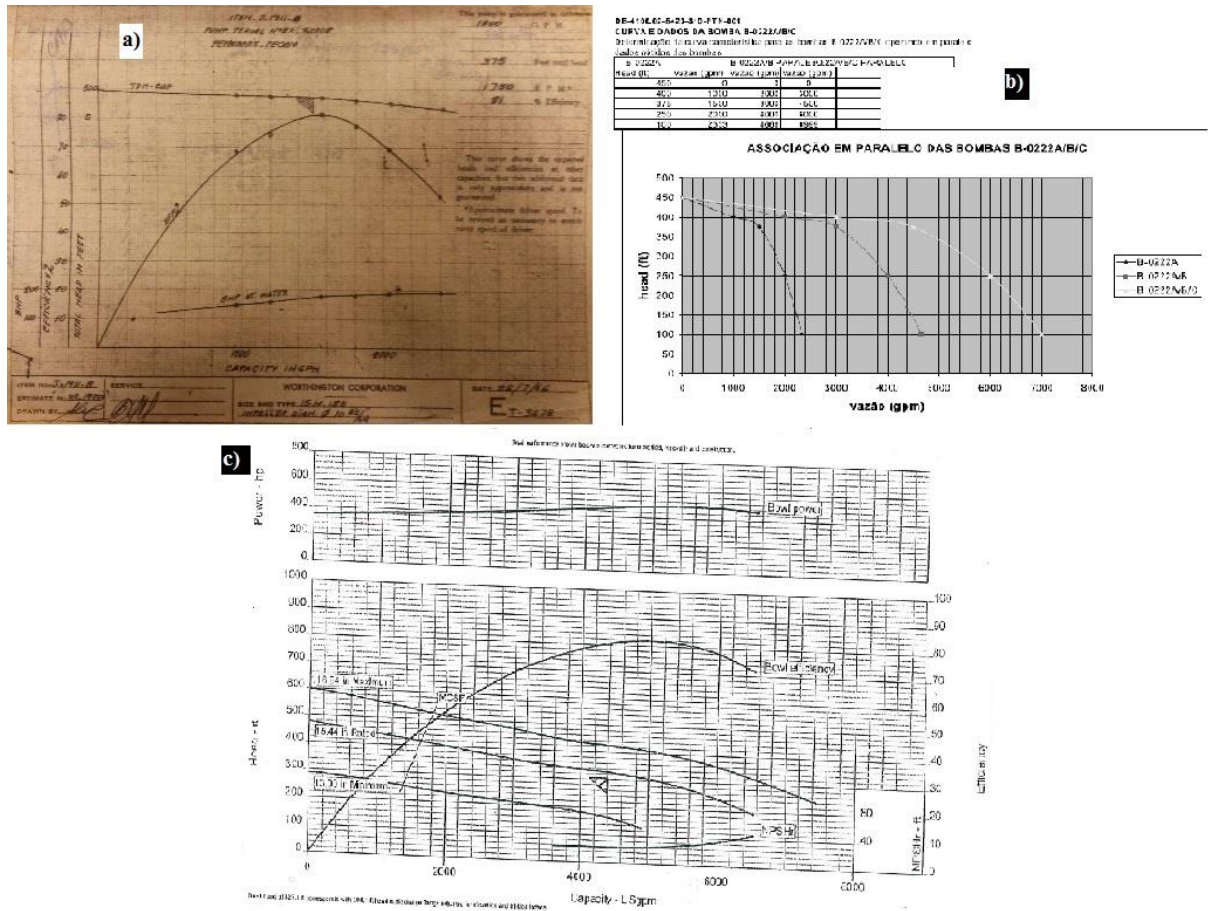
Ao longo da vida útil do motor novos parâmetros foram determinados a partir de estudos e medições contratadas pela empresa para estudar a eficiência e desempenho dos motores, isto gerou novos documentos técnicos que levaram em conta o desgaste e a característica operacional do equipamento, estes documentos foram utilizados em substituição aos documentos de projeto.

Estes valores experimentais se baseiam principalmente quanto aos parâmetros relativos à eficiência mecânica da bomba, tais como as curvas de eficiência, vazão, potência e altura manométrica.

---

<sup>16</sup> Código de identificação de um equipamento utilizado comumente na indústria. Permanece o mesmo durante toda a vida do equipamento e não é transferido.

Figura 31 - Curvas das bombas: a) B-0222B (original); b) 0222B em associação; c) 0225C



Fonte: Documentos Técnicos internos da TRANSPETRO

Os dados elétricos e de projeto dos motores foram obtidos através de consulta ao arquivo técnico do TEMADRE, observações de campo e dados de plaqueta, além do cadastro do equipamento no software de controle interno de equipamentos do terminal. Os dados elétricos mais importantes estão evidenciados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados básicos dos motores

| Motor                 | B-0222B | B-0225B | B-0225C |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Corrente Nominal (A)  | 68      | 68      | 68,6    |
| Tensão Nominal (V)    | 2300    | 2300    | 4160    |
| Potência (CV)         | 300     | 300     | 544     |
| Rendimento a 100%     | 89      | 94,8    | 95,2    |
| Cos φ a 100%          | 0,87    | 0,86    | 0,85    |
| Rotação Nominal (RPM) | 1775    | 1775    | 1780    |
| Frequência (Hz)       | 60      | 60      | 60      |

Fonte: Adaptada de documentos técnicos dos equipamentos



### 3.3.2 Procedimento de operação

Pelo menos uma das bombas de água salgada deve operar em tempo integral, nos eventos de operação dos trocadores de *Boill-Off* (EA-108, EA-109 e EA-110), *Flash* (EA-112) e de água doce (EA-115A/B) apenas uma bomba de menor capacidade é requerida (ver 3.3.1), no entanto quando as operações de refrigeração (EA-105), regeneração (EA-116) e/ou aquecimento de GLP (P-0301) estiverem em curso é necessário operar com as duas bombas de menor capacidade ou a B-0225C<sup>15</sup>.

O sistema deve operar com pressão entre 5,0 e 6,0 Kgf/cm<sup>2</sup> <sup>15</sup>, o trocador de *Flash* e os três trocadores de *Boill-Off* devem ficar sempre alinhados para que se mantenha a pressão nos níveis descritos no padrão de operação e para permitir uma partida rápida do sistema de *Flash* em caso de aumento súbito de pressão nos tanques. Portanto mesmo que os sistemas de reliquefação (*Flash* e *Boill-Off*) não estejam em operação os trocadores permanecem alinhados<sup>17</sup> promovendo um gasto energético desnecessário.

Em caso de necessidade de operação do sistema de refrigeração com regeneração ou não e aquecimento de GLP, uma maior vazão de água é requerida pela planta e as bombas de menor capacidade (B-0222B e B-0225B) não são capazes de fornecer a vazão requerida. Nestes casos o procedimento operacional orienta a operação das duas bombas em paralelo (B-0222B e B-0225B) ou apenas a B-0225C que tem a capacidade de suprir operações deste tipo<sup>15</sup>.

---

<sup>17</sup> Informação obtida em entrevista verbal com a Coordenadora Técnica Operacional do parque Maria Quitéria Aline Cláudia Franca Teixeira em 09/06/16.

#### 4 LEVANTAMENTO, TRATAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS

Para a estimativa de eficiência das bombas de água salgada com a instalação do inversor de frequência, foi necessária a medição do estado atual do sistema, ou seja, medições elétricas mostraram-se necessárias de modo a quantificar o consumo elétrico atual dos motores em estudo.

Para tal foi utilizado um medidor de qualidade energética com a capacidade de registrar os parâmetros necessários para o cálculo da potência consumida pelo motor, que são, basicamente, corrente e tensão.

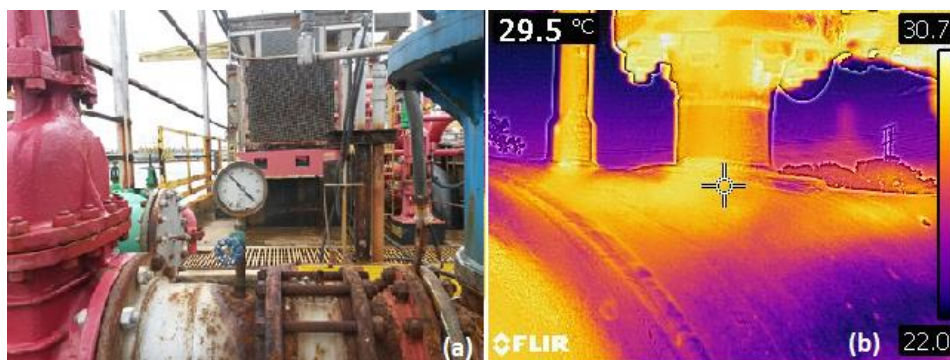
Um analisador modelo RE6000 da EMBRASUL de propriedade do laboratório de qualidade de energia da UNIFACS foi utilizado para as medições, foi aberta nota de manutenção para a instalação do equipamento (ANEXO B).

Os dados de processo foram coletados a partir da análise dos padrões operacionais do SEGAS, entrevistas a operadores experientes da planta e consulta ao arquivo técnico do TEMADRE além de acompanhamentos em campo e sistema de controle supervisório de operações reais no período entre 18/05/2016 e 09/09/2016.

Foram realizadas medições de temperatura do produto nas linhas a partir de instrumentos instalados no local e a partir de uma câmera térmica da marca FLIR de propriedade da TRANSPETRO para os locais onde não haviam instrumentos instalados.

As fotos térmicas foram utilizadas também, para ilustrar o comportamento térmico do produto nos compressores e trocadores de calor. Medições de variáveis diversas foram também, coletadas a partir do console operacional do SEGAS, parâmetros como, temperatura, vazão e pressão foram analisados nos pontos onde haviam instrumentos disponíveis para a coleta de dados, instrumentos locais também foram utilizados.

Figura 32 - Metodologias de coleta de dados (a) Instrumento local, (b) Câmera térmica



Fonte: Fotografia retirada pelo autor (2016).

#### 4.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DO CONSUMO

Como já dito no item anterior foi definido que os valores de consumo elétrico seriam coletados em tempo real a partir de um analisador de qualidade de energia instalado no sistema elétrico do motor. Com isso, seria possível abranger uma gama muito maior de cenários de processo além de facilitar a coleta de dados sem necessariamente acessar uma subestação ou painel elétrico, visto que, os acessos a estes locais são extremamente controlados na TRANSPETRO.

Antes da instalação foram analisados os desenhos elétricos e diagramas unifilares<sup>18</sup> de ligação dos motores a fim de definir o melhor ponto para a coleta dos dados. Para uma melhor confiabilidade, inicialmente foi decidido pela coleta dos parâmetros das três fases sendo que em cada fase seria registrado tensão e corrente, parâmetros essenciais para o cálculo do consumo energético que seria no final o produto principal da medição.

Ao analisar os desenhos e o sistema elétrico verificou-se que se tratavam de motores que operam com tensões nominais de 2400 (B-0222B e B-0225B) e 4160V (B-0225C) conforme já exposto em 3.3.1, com isso o acesso aos cabos de tensão só é permitido com o sistema desenergizado, além do que o analisador definido para o estudo opera com tensões máximas de 600V, estes fatores tornaram a medição a partir da gaveta de acionamento do motor impossível.

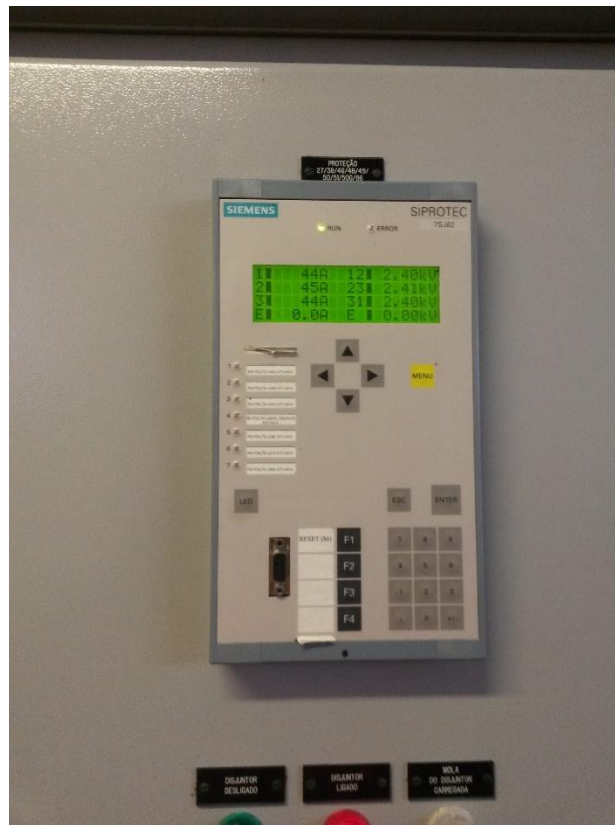
Uma opção foi à medição local dos valores de tensão e corrente através dos painéis disponíveis na subestação (Figura 33). Este procedimento tornou-se viável, no entanto, não há por parte do SEGAS uma previsibilidade das operações, estas podem ocorrer a qualquer hora do dia ou da noite.

Este fato tornaria a pesquisa demorada, uma vez que os valores deveriam ser coletados em campo no momento de ocorrência das operações, além disso, existem as exigências da empresa e legais para o acesso a subestação, não havia pessoal capacitado disponível para coletar os dados em todos os momentos necessários.

---

<sup>18</sup> Desenho técnico que indica as ligações básicas de um determinado sistema elétrico

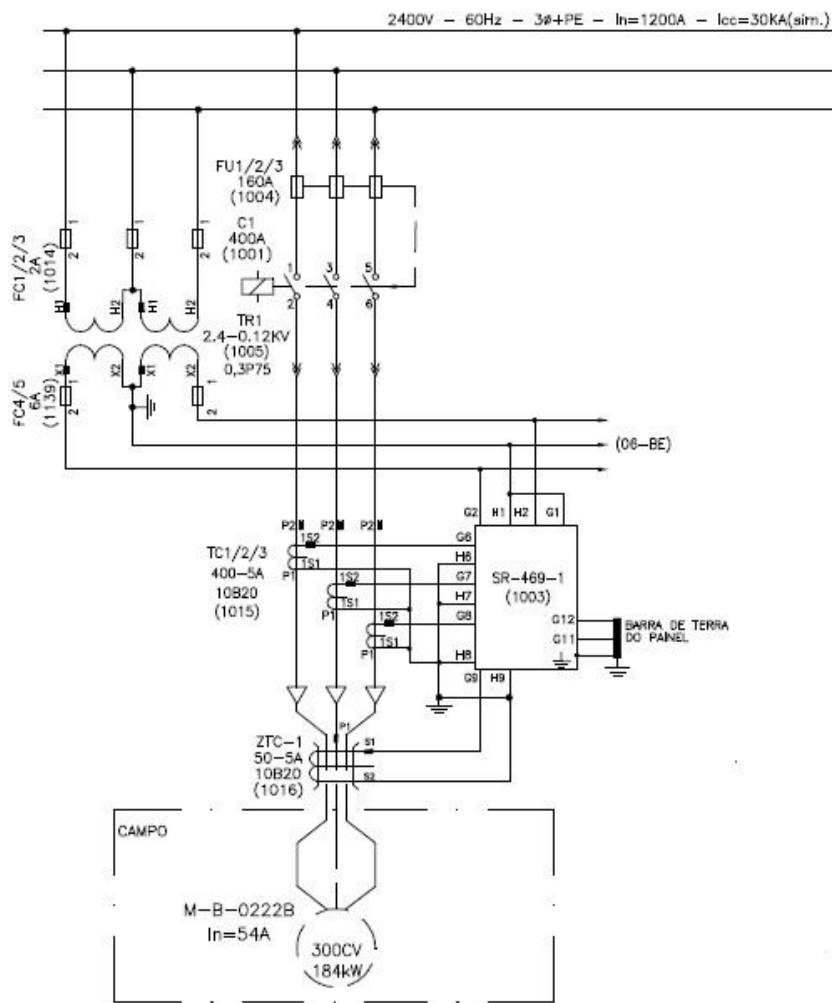
Figura 33 - Painel da B-0222B e 0225B na subestação



Fonte: Fotografia retirada pelo autor (2016).

Uma terceira opção encontrada juntamente com os orientadores foi instalar o medidor no secundário dos TC e TP do equipamento. O TC (Transformador de corrente) e TP (Transformador de potencial) são componentes destinados a medições, controle ou proteção (FERNANDES, 2008) e operam transformando as altas e elevadas tensões e correntes do motor, em tensões e correntes da ordem de 120V e 5A (para este caso específico), no entanto, são perfeitamente proporcionais as grandezas do próprio motor. A partir daí a medição e registro através do analisador tornou-se plenamente possível.

Figura 34 - Diagrama elétrico funcional da B-0222B



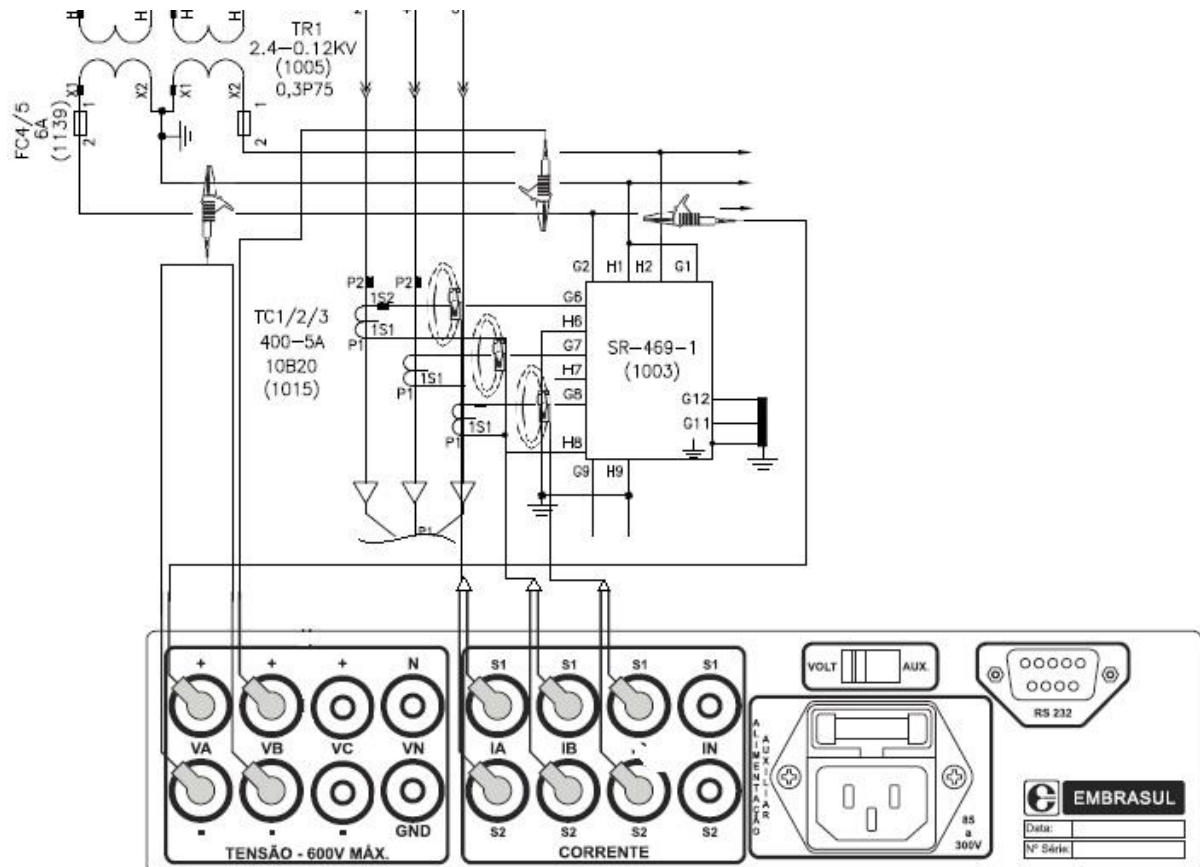
Fonte: Desenho de engenharia da B-0222B (Documento interno do Sistema PETROBRAS)

Como se pode perceber através da Figura 34 o TP rebaixa cada 2.400V de alimentação da B-0222B em 120V para o mesmo e o TC rebaixa cada 400A para a bomba para 5A para este, com isto pode-se instalar o medidor em um painel de baixa tensão que possibilitou a informação e registro de todos os parâmetros do sistema.

Ainda na Figura 34 pode-se visualizar que uma das fases é aterrada, sendo assim a medição gerou apenas o registro de duas fases de tensão para o motor. Outro ponto importante é que como havia apenas um analisador disponível, este foi instalado no motor da B-0222B por ser a bomba principal em operação no SEGAS, os valores obtidos na B-0225B tiveram que ser coletados a partir do painel de campo.

A B-0225C estava em manutenção à época da pesquisa e devido a isso a operação com a mesma não foi considerada e foi levada em conta apenas a nível teórico. A instalação do medidor no TC e TP ao final ficou conforme exposto na Figura 35 abaixo.

Figura 35 - Pontos de instalação do analisador



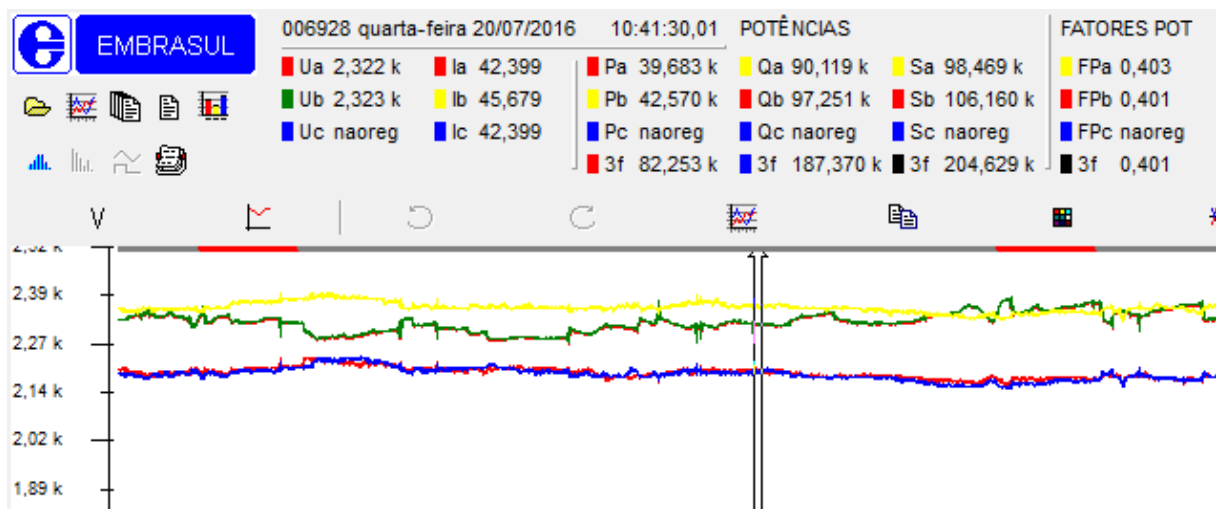
Fonte: Adaptado de EMBRASUL (2002) e Esquema de Engenharia B-0222B.

A corrente foi coletada a partir do cabo que se liga a G6, G7 e G8 para as fases A, B e C respectivamente; a tensão foi coletada nos pontos G2 e H2 para as fases A e B; o neutro foi obtido a partir de H1 (ver Figura 35). O analisador possui a opção de configurar a entrada do TP e TC, sendo assim foi pré-configurado no mesmo os valores de rebaixamento do TP de 2.400-120V e TC de 400-5A, com isso as variáveis foram registradas diretamente nas suas magnitudes reais não sendo necessário transformação posterior das mesmas.

Como uma das fases não foi registrada, os valores de potência obtidos no analisador não puderam ser considerados diretamente. Para o cálculo da energia consumida em cada operação igualou-se os valores de tensão da fase C com os medidos na fase A devido ao equilíbrio de corrente entre as duas verificado no painel de campo que inferiam um também equilíbrio de tensão.

Outro ajuste necessário foi com relação ao fator de potência do motor. Devido a configurações internas do analisador o fato de não ser realizada medição na fase C provocou a leitura do fator de potência entre fase e neutro e não entre fase e fase como propõe o manual do equipamento em EMBRASUL (2002), com isso, o fator de potência fornecido pelo analisador não é suficiente para o cálculo das potências ativas e reativas. Portanto foi necessário realizar a correção de  $30^\circ$  em cada angulação para o fator de potência, esta é justamente a diferença de ângulo entre a tensão fase-neutro e a tensão fase-fase em um sistema trifásico equilibrado (ALBUQUERQUE, 1989) que é o caso da B-0222B conforme pôde ser demonstrado nas medições efetuadas (APÊNDICE B).

Figura 36 - Exemplo de medição do analisador de energia



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de software ANL6000<sup>19</sup>

Usando o exemplo de medição para a fase A da Figura 36 e a Equação 12 é demonstrada a metodologia utilizada para o cálculo do fator de potência.

$$FP = \cos\varphi \quad (12)$$

$$\varphi_m = \arccos(0,403), \text{ para a fase A;}$$

$$\varphi_m = 66,23^\circ$$

$$\varphi_r = 66,23 - 30 = 36,23^\circ$$

$$FP_{cor} = \cos(36,23^\circ)$$

$$FP_{cor} = 0,807$$

<sup>19</sup> Software de propriedade da EMBRASUL que trata e manipula os dados obtidos no analisador de energia modelo RE6000

Onde:

$\varphi_m$ =ângulo medido pelo analisador (fase-neutro);

$\varphi_r$ =ângulo real do circuito (fase-fase);

$FP_{cor}$ =Fator de potência corrigido (adimensional).

A partir dos valores medidos a potência para cada condição foi obtida através do somatório das potências ativas individuais das fases A, B e C utilizando a Equação 13. A tensão registrada pelo analisador diz respeito ao valor entre fases, para a obtenção da tensão fase-neutro foi necessário dividir o valor medido por raiz quadrada de 3<sup>20</sup> e, em seguida, utilizá-lo para o cálculo da potência em cada fase.

$$P_A = V_{FN-A} \cdot I_A \cdot \cos\varphi_{rA};$$

$$P_B = V_{FN-B} \cdot I_B \cdot \cos\varphi_{rB};$$

$$P_C = V_{FN-C} \cdot I_C \cdot \cos\varphi_{rC};$$

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (13)$$

Onde:

$P_A, P_B, P_C$ =Potência ativa nas fases A, B e C respectivamente (W);

$V_{FN-A}, V_{FN-B}, V_{FN-C}$ = Tensão fase neutro nas fases A, B e C respectivamente (V);

$I_A, I_B, I_C$ =Corrente nas fases A, B e C respectivamente (A);

$\cos\varphi_{rA}, \cos\varphi_{rB}, \cos\varphi_{rC}$ = Fator de potência nas fases A, B e C respectivamente (adimensional);

$P$ =Potência ativa do motor (W).

## 4.2 CÁLCULO DA ENTALPIA

Os valores de entalpia foram calculados analisando-se a composição dos cinco últimos envios de GLP da Refinaria Landulpho Alves para o SEGAS anteriores ao dia 20/07/2016. A partir do percentual individual em volume de cada componente evidenciado nos certificados de ensaio (ANEXO C) foi gerada uma composição média de gás visualizada na Tabela 4.

---

<sup>20</sup>  $V_{F-F} = V_{F-N} \cdot \sqrt{3}$



Tabela 4 - Composição média utilizada para o GLP

| Origem x data<br>Componente | EF-4670B<br>17/06/16 | EF-4670F<br>20/06/16 | EF-4670C<br>22/06/16 | EF-4670F<br>23/06/16 | EF-4670B<br>02/07/16 | Média         |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| 1,3 Butadieno               | 0,97                 | 1,11                 | 1,04                 | 0,98                 | 0,57                 | 0,934         |
| N-Butano                    | 14,24                | 10,26                | 12,62                | 11,91                | 12,61                | 12,328        |
| ISO-Butano                  | 19,76                | 18,14                | 18,94                | 17,62                | 18,24                | 18,54         |
| CIS-Buteno-2                | 6,57                 | 5,6                  | 4,76                 | 4,99                 | 7,07                 | 5,798         |
| TRANS-Buteno-2              | 9,72                 | 9,3                  | 8                    | 7,82                 | 9,68                 | 8,904         |
| ISO-Buteno                  | 13,11                | 17,2                 | 15,55                | 15,02                | 10,3                 | 14,236        |
| Buteno-1                    | 9,68                 | 13,53                | 12,17                | 12,41                | 8,36                 | 11,23         |
| Propano                     | 24,83                | 19,57                | 24,97                | 26,91                | 11,34                | 21,524        |
| Propeno                     | 0,37                 | 4,95                 | 1,33                 | 1,74                 | 20,58                | 5,794         |
| Metano                      | <0,01                | <0,01                | <0,01                | <0,01                | <0,01                | <0,01         |
| Etano                       | 0,71                 | 0,28                 | 0,58                 | 0,58                 | 0,1                  | 0,45          |
| Butanos                     | 73,09                | 75,14                | 73,06                | 70,74                | 66,27                | 71,66         |
| Pentanos e mais pesados     | 0,02                 | 0,05                 | 0,06                 | 0,02                 | 0,44                 | 0,118         |
| Total (%)                   | <b>99,98</b>         | <b>99,99</b>         | <b>100,02</b>        | <b>100</b>           | <b>99,29</b>         | <b>99,856</b> |
| Propano/Butano/Propeno      | <b>98,29</b>         | <b>99,66</b>         | <b>99,36</b>         | <b>99,39</b>         | <b>98,19</b>         | <b>98,978</b> |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016) a partir de boletins de ensaio RLAM

De acordo com ANP (2004) o GLP deve ser uma mistura de propano e butano com massa específica acima de 550 Kg/m<sup>3</sup>. O somatório dos percentuais individuais dos componentes da coluna “Média” da Tabela 4, está em acordo com o total da mistura, ou seja, atingiu valores próximos a 100%. Este fato certifica a metodologia utilizada para a obtenção da composição média.

O percentual “Butanos” na Tabela 4, refere-se, na verdade, à soma dos componentes 1,3 Butadieno, N-Butano, ISO-Butano, CIS-Buteno-2, TRANS-Buteno-2, ISO-Buteno e Buteno-1.

Para questões relativas à entalpia, a forma de ligação do butano pode ser relevante para a energia do produto, sendo assim, a entalpia foi calculada levando-se em consideração a composição individual de cada composto e não apenas o valor “Butanos”. Inicialmente o cálculo foi feito utilizando-se dados tabelados e posteriormente o resultado foi comparado com a entalpia obtida através de software computacional para avaliação do método mais adequado.

Para a entalpia da água salgada foi, inicialmente, analisada a salinidade média da baía de Todos os Santos e realizada pesquisa em bibliografia oceanográfica para verificar a composição básica de sais na água do mar.

Como resultado encontrou-se que as águas supracitadas possuem salinidade variando de 35,6 a 37,2 (CIRANO; LESSA, 2007). Em termos de salinidade oceanográfica, este número expressa que em cada quilograma de água ter-se-á 35,6 a 37,2 gramas de sal.

Millero (2013) em seu estudo sobre oceanografia química obteve o percentual de cada sal presente por quilograma de água do mar a partir de análises bibliográficas dos íons presentes no oceano.

Tabela 5 - Composição de sais na água do mar

| Sal                             | g/Kg            | mol/Kg  | Peso Molar |
|---------------------------------|-----------------|---------|------------|
| <b>Gravimétricos</b>            |                 |         |            |
| NaCl                            | 24,8789         | 0,42568 | 58,4428    |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 4,1566          | 0,02926 | 142,0372   |
| KCl                             | 0,7237          | 0,00971 | 74,5550    |
| NaHCO <sub>3</sub>              | 0,1496          | 0,00178 | 84,0070    |
| KBr                             | 0,1039          | 0,0087  | 119,0060   |
| B(OH) <sub>3</sub>              | 0,0266          | 0,00043 | 61,8322    |
| NaF                             | 0,0030          | 0,00007 | 41,9882    |
| Σ=                              | 30,0413         | 79,9040 | 0,0008727  |
| <b>Volumétricos</b>             |                 |         |            |
| MgCl <sub>2</sub>               | 5,2121          | 0,05474 | 95,211     |
| CaCl <sub>2</sub>               | 1,1828          | 0,01066 | 110,986    |
| SrCl <sub>2</sub>               | 0,0149          | 0,00009 | 158,526    |
| Σ=                              | <b>36,4511</b>  |         |            |
| H <sub>2</sub> O                | <b>963,5489</b> |         |            |

Fonte: Millero (2013, p.68).

Percebe-se que 68,25% dos sais presentes na água é Cloreto de Sódio (NaCl), sendo que em cada quilograma de água, tem-se 24,8789 gramas de NaCl, ou seja 2,4275% em massa.

Apesar de existir ampla bibliografia sobre a composição e características da água do mar, não foram encontrados estudos que pudessem servir de base para embasar o cálculo diferenciado de entalpia entre água salgada e água doce. Em contrapartida Souza (2002) afirmou que as características termodinâmicas para as águas doce e do mar são bem semelhantes.

No software ProPhyPlus<sup>21</sup>, também não foi possível obter a entalpia para a água do mar. A diferença de estado entre a água e o NaCl, provocou um erro de software o que inviabilizou o cálculo deste composto pelo programa.

Devido ao exposto os valores de entalpia para a água do mar serão utilizados como sendo os mesmos obtidos para a água doce.

#### **4.2.1 Cálculo utilizando constantes termodinâmicas**

Como os valores apresentados para a composição no boletim de ensaio são exibidos como percentual em volume foi necessário efetuar as correções para percentual em massa e molar a fim de que a entalpia encontrada fosse replicável aos diversos estados em que o GLP será estudado. Para isso utilizou-se as tabelas disponíveis em Maxwell (1968) e Brasil (2013) donde foi obtido o teor mássico de cada componente conforme pode ser visualizado no APÊNDICE A.

Tendo em mãos os percentuais em massa e obtendo a entalpia dos componentes a partir dos gráficos de Maxwell (1968), chegou-se aos valores de entalpia individual e posteriormente da mistura a partir do cálculo da média ponderada. Um exemplo desta metodologia está evidenciado na Tabela 6 onde a entalpia obtida foi de 810,38 kJ/Kg de GLP a 106,01°C e 15,03 Kgf/cm<sup>2</sup> para um dos pontos do experimento.

---

<sup>21</sup> Software desenvolvido pela ProSim S.A. destinado a cálculos termodinâmicos.

Tabela 6 - Cálculo entalpia GLP

|                         |                    |                   | BTU/lb                                   | kJ/Kg         |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--|---------------|
| Componente              | % massa APÊNDICE A | % massa ajustado. | T=106,01°C<br>P=15,03kgf/cm <sup>2</sup> |               |
| 1,3-BUTADIENO           | 0,01033            | -                 | -  | -             |
| N-BUTANO                | 0,12707            | 0,12893           | 351                                      | 816,43        |
| ISO-BUTANO              | 0,18397            | 0,18666           | 331                                      | 769,91        |
| CIS-BUTENO-2            | 0,06413            | 0,06507           | 346                                      | 804,80        |
| TRANS-BUTENO-2          | 0,09589            | 0,09729           | 347                                      | 807,12        |
| ISO-BUTENO              | 0,15064            | 0,15285           | 348                                      | 809,45        |
| BUTENO-1                | 0,11901            | 0,12075           | 348                                      | 809,45        |
| PROPANO                 | 0,19185            | 0,19465           | 365                                      | 848,99        |
| PROPENO                 | 0,05303            | 0,05380           | 350                                      | 814,10        |
| METANO                  | 0,00004            | -                 | -  | -             |
| ETANO                   | 0,00272            | -                 | -  | -             |
| PENTANOS E MAIS PESADOS | 0,00132            | -                 | -  | -             |
| <b>Total</b>            | 1,00000            | 1,00000           | 348,40                                   | <b>810,38</b> |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016) a partir de dados próprios de Maxwell (1968).

Devido à ausência de tabelas em Maxwell (1968), associado ao seu baixo valor mássico na mistura, o componente 1,3-butadieno não foi considerado no cálculo. Os componentes metano, etano e pentano (e mais pesados) foram também, excluídos do cálculo devido a sua baixa contribuição para a mistura (APÊNDICE A). Sendo assim foi necessário obter o percentual em massa ajustado (%m ajustado) que foi a composição efetivamente utilizada. Concluiu-se que a contribuição destes componentes para a mistura não seria relevante a ponto de comprometer o objetivo da dissertação que seria aumentar a eficiência energética do processo de bombeamento de água salgada.

#### 4.2.2 Cálculo a partir do ProPhyPlus

Programas para o cálculo de entalpia foram amplamente pesquisados a fim de tornar o cálculo da entalpia mais eficiente e direto, no entanto, os resultados das buscas não apresentaram uma grande variedade e disponibilidade de softwares para este fim. Foi encontrado de maneira gratuita apenas a versão “demo” do ProPhyPlus, que é um software para cálculos termodinâmicos.

Para o cálculo com o ProPhyPlus basta informar ao software os componentes da mistura e a fração em massa ou molar de cada um, todavia, a versão utilizada do software não

dispunha de todos os componentes do GLP visualizados no ANEXO C. Percebeu-se que principalmente as frações que representavam os arranjos moleculares do butano não estavam disponíveis. Devido a isso, para base de cálculo usou-se a composição “Butanos” tomando como premissa o que fora discutido em 4.2. A composição utilizada para cálculo a partir do software pode ser visualizada na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição utilizada no ProPhyPlus

| Componente              | % massa<br>APENDICE A | % massa<br>ProPhyPlus |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| N-Butano (Butanos)      | 73,86                 | 74,79                 |
| Propano                 | 19,18                 | 19,43                 |
| Propeno                 | 5,30                  | 5,37                  |
| Metano                  | 0,00                  | 0,00                  |
| Etano                   | 0,27                  | 0,28                  |
| Pentanos e mais pesados | 0,13                  | 0,13                  |
| <b>Total (%)</b>        | <b>98,76</b>          | <b>100</b>            |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Com a utilização do software percebeu-se que o mesmo apresentava para a entalpia valores absolutos diferentes dos encontrados através dos cálculos via tabela. Foram obtidos valores negativos para a entalpia em kJ/Kg (APÊNDICE D). No entanto estes resultados não descartam os resultados do programa,

a energia interna e a entalpia são funções de estado e que, portanto, dependem dos estados inicial e final, elas não têm valor absoluto; somente variações de energia interna e de entalpia podem ser calculadas Brasil (2013, p.210).

#### 4.2.3 Comparação e método utilizado

A partir da obtenção dos resultados através das tabelas termodinâmicas de Maxwell (1968) percebeu-se que o cálculo de cada ponto de entalpia custaria um tempo demasiado, haja vista a quantidade de trocadores envolvidos e de componentes no GLP. Por este motivo, uma comparação com os dados obtidos a partir do software ProPhyPlus foi considerada para tomada de decisão acerca da metodologia mais adequada para o cálculo da entalpia.

Apesar dos valores absolutos de entalpia obtidos no software apresentarem-se negativos e diferentes quando comparados aos obtidos através de tabelas e gráficos, a grandeza necessária para o cálculo da eficiência termodinâmica do trocador é a diferença

entre as entalpias de entrada e saída conforme já discutido em 3.2.2 e apresentado na Equação 10.

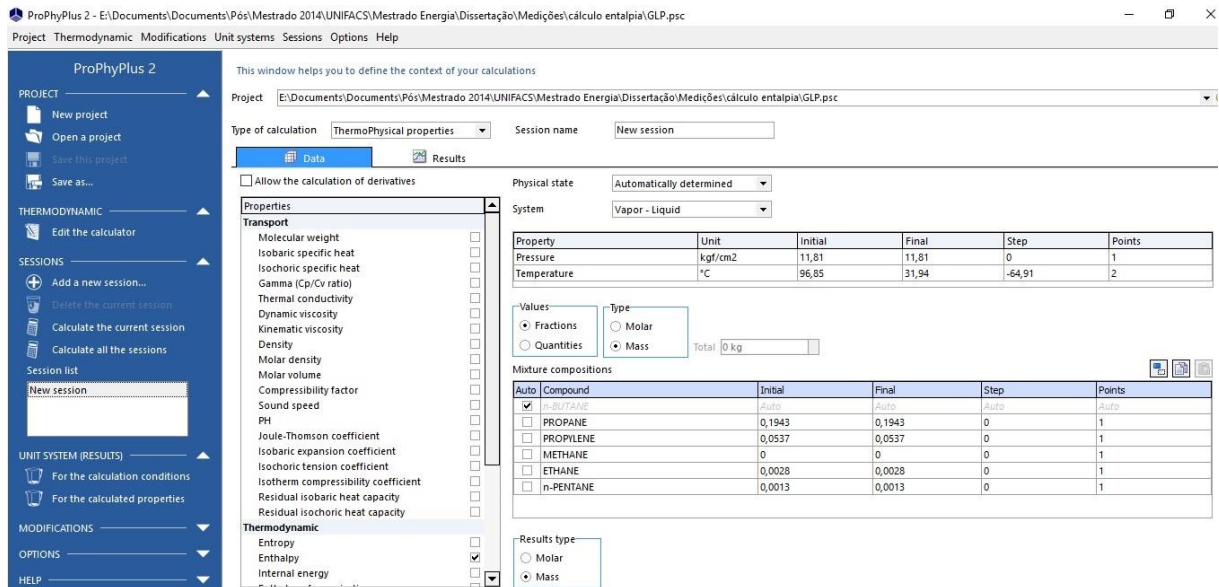
Brasil (2013) afirma ainda, que o valor pontual da entalpia não é relevante, pois depende do referencial utilizado para o cálculo, todavia, sua variação é o ponto de atenção para o cálculo da energia trocada. Portanto, a fim de comprovar que os valores obtidos a partir do ProPhyPlus seriam representativos para o cálculo de eficiência dos trocadores, foi realizada comparação entre as diferenças de entalpia de entrada e saída em doze exemplos conforme pode ser visto no APÊNDICE D.

A partir deste, pode-se perceber que apesar dos valores pontuais terem uma discrepância demasiada, as diferenças entre os pontos ( $\Delta$ ) apresentaram-se coerentes entre os métodos estudados conforme já discutido no item anterior (4.2.2). Para confirmar e validar o método outros fluidos que não o GLP, foram utilizados para comparação. Metano, nitrogênio e água apresentaram o mesmo comportamento quanto à diferença de entalpia. As tabelas utilizadas para estes fluidos foram obtidas em Sonntag, Borgnakke e Wylen (2003) com o objetivo de efetuar comparações com outros autores.

Conforme o exposto chegou-se à conclusão que os dados obtidos a partir do software são os mais representativos, seriam suficientes para o alcance do objetivo específico de estimar a eficiência do trocador a partir da energia trocada entre os fluidos. O erro médio entre os 12 pontos observados no APÊNDICE D foi de 4,1%, sendo que os maiores erros pontuais foram obtidos para a água devido ao seu baixo valor de entalpia.

Com isso utilizou-se a composição apresentada na Tabela 7 para o GLP visando o cálculo da entalpia e posteriormente, eficiência do trocador. A Figura 37 demonstra a tela do software com a composição utilizada.

Figura 37 - Composição utilizada no ProPhyPlus



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016) a partir de software ProPhyPlus.

#### 4.3 VAZÃO DE ÁGUA E POTÊNCIA DA BOMBA

Para a análise de consumo do conjunto moto-bomba com a utilização do inversor de frequência, foi verificada a vazão necessária por operação a partir da necessidade termodinâmica de cada trocador tomando como parâmetros os dados obtidos de acordo com informações expostas no item 4. A partir destes foi comparada a situação desejada com a condição atual da bomba e/ou com os dados de projeto expostos em 3.3.1 e verificado em que condição de operação está o conjunto moto-bomba.

A vazão em cada condição foi determinada a partir de cálculos hidrodinâmicos que seguem ao raciocínio deste subcapítulo. Conhecendo-se a pressão de descarga pode-se chegar ao valor do "head" (H); BID (2011, p. 43) afirma que no caso de bombas verticais a medição da pressão de sucção pode ser descartada assumindo-se certos parâmetros como pressão da coluna d'água no bocal de sucção.

Como a bomba succiona da água do mar assumiu-se a pressão na sua sucção como sendo igual à pressão de coluna d'água fornecida pela profundidade do bocal de sucção, a folha de dados da bomba B-0225B informa a altura de submersão mínima necessária como sendo 0,61 m, sendo assim pode-se calcular a pressão na sucção através da equação abaixo:

$$P_s = \rho \cdot g \cdot h \quad (14)$$

Onde:

$\rho$ = massa específica da água do mar (1030 Kg/m<sup>3</sup><sup>22</sup>);

$g$ = aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>);

$h$ = profundidade mínima do bocal de sucção (0,61 m<sup>22</sup>).

A pressão atmosférica exercida no bocal de sucção foi desconsiderada em virtude dos parâmetros de descarga subsequentes serem coletados de instrumentos que registram a pressão manométrica e não a absoluta.

A pressão de descarga ( $P_d$ ) foi medida diretamente no indicador de pressão instalado na saída da B-0222B e foi considerada sua variação com as operações acompanhadas. A partir da pressão de sucção e de descarga pode-se calcular o head ou carga da bomba através da Equação 15 (BID, 2011, p.43):

$$H=(P_d-P_s).10,3 \quad (15)$$

Onde:

$H$ = head da bomba (m.c.a)

$P_d$ =pressão da descarga da bomba (Kgf/cm<sup>2</sup>);

$P_s$ =pressão da sucção da bomba (Kgf/cm<sup>2</sup>).

A potência consumida pela bomba foi obtida através das medições contínuas do analisador de energia. A partir destas e do acima exposto pode-se chegar à vazão momentânea da bomba através da Equação 17, que por sua vez, é derivada da equação de potência elétrica (Equação 16) (MATTOS; FALCO, 1998, p.131).

$$P_{el} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_b \cdot \eta_m} \quad (16)$$

$$Q = \frac{P_{el} \cdot \eta_b \cdot \eta_m}{\gamma \cdot H} \quad (17)$$

Onde:

$Q$ =vazão instantânea (m<sup>3</sup>/s);

$P_{el}$ =potência elétrica – Equação 13 (W);

$\eta_b$ =rendimento da bomba (0,8<sup>23</sup>);

$\eta_m$ =rendimento do motor (0,89<sup>24</sup>);

<sup>22</sup> Obtido a partir da folha de dados da B-0225B.

<sup>23</sup> Rendimento estimado a partir da curva eficiência-vazão da B-0222B para a condição calculada vazão global média para o processo (540 m<sup>3</sup>/h).

<sup>24</sup> Obtido a partir da folha de dados do motor da B-0222B



$\gamma$ =peso específico (N/m<sup>3</sup>);

H=head (m.c.a)

Utilizando-se os valores obtidos em campo para a pressão de descarga, o *Head* calculado pela Equação 15 e potência elétrica, pode-se chegar ao valor estimado da vazão atual do sistema em m<sup>3</sup>/s de água salgada.

O valor atual da vazão de água salgada para cada operação é indispensável para o cálculo da eficiência atual do trocador o qual será utilizado como referência para o cálculo otimizado da vazão de água.

Com a alteração da rotação há uma mudança cúbica na energia consumida pela bomba conforme já exposto em 2.2.1. Esta rotação altera também a vazão da máquina e, por conseguinte, a energia consumida que é o objetivo final da análise.

A vazão da bomba varia com a rotação de acordo com a Equação 18 (MATTOS; FALCO, 1998, p.150).

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (18)$$

Onde:

$Q_1$ =vazão da condição sem inversor (m<sup>3</sup>/s);

$Q_2$ =vazão otimizada a partir do balanço energético (m<sup>3</sup>/s);

$n_1$ =rotação da condição sem inversor (RPM);

$n_2$ =rotação otimizada pela vazão  $Q_2$  (RPM).

Ainda segundo De Mattos e De Falco (1998, p.150) a potência consumida pelo motor varia com o cubo da vazão de acordo com a Equação 19. A partir desta é possível calcular a variação de potência necessária com a mudança das condições de vazão do sistema moto-bomba.

$$\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 = \frac{P_2}{P_1} \quad (19)$$

Onde:

$P_2$ =potência da bomba na vazão dois (potência ótima - W);

$P_1$ =potência da bomba na rotação atual (W).

O valor obtido para a potência pela Equação 19 fornece o consumo do conjunto moto-bomba por hora onde para o consumo global este deve ser multiplicado pela quantidade de horas em cada condição de operação.

#### 4.4 ENERGIA CALCULADA POR PROCESSO

Para o cálculo do consumo energético foram consideradas as condições operacionais observadas e registradas no SEGAS. Não foi possível calcular a vazão de água salgada individualizada por trocador, vazão esta que é necessária para o cálculo da eficiência do equipamento de acordo com a Equação 11 e, por conseguinte, obtenção do consumo energético real por operação. Foi utilizada, portanto, uma estimativa tendo como base a vazão de projeto dos trocadores nas condições operacionais descritas nos itens 3.1.1 a 3.1.5 e refletidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Trocadores envolvidos por processo

| Processo           | Trocadores alinhados                                     | Processo envolvido   | Bombas utilizadas          | Vazão total projetada (Kg/h) |
|--------------------|--|--|----------------------------|------------------------------|
| Condição rotineira | EA-112, EA-108, EA-109, EA-110 e EA-115 <sup>a</sup>     | <i>Flash, Boill-Off</i> e Resfriamento de água doce                            | B-0222B ou B-0225B         | 302.481                      |
| Refrigeração       | EA-105, EA-112, EA-108, EA-109, EA-110 e EA-115A         | Refrigeração, <i>Flash, Boill-Off</i> e Resfriamento de água doce              | B-0222B+B-0225B ou B-0225C | 752.481                      |
| Regeneração        | EA-116, EA-105, EA-112, EA-108, EA-109, EA-110 e EA-115A | Regeneração, Refrigeração, <i>Flash, Boill-Off</i> e Resfriamento de água doce | B-0222B+B-0225B ou B-0225C | 794.739                      |
| Aquecimento de GLP | P-0301, EA-112, EA-108, EA-109, EA-110 e EA-115A         | Aquecimento, <i>Flash, Boill-Off</i> e Resfriamento de água doce               | B-0222B+B-0225B ou B-0225C | 831.809                      |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Percebe-se conforme já discutido em 3.3.2 que mesmo sem a real necessidade há pelo menos cinco trocadores com fluxo de água salgada permanentemente. Conhecendo-se a vazão total projetada por processo evidenciada na Tabela 8, e as vazões de projeto individualizadas dos trocadores, chegou-se ao valor percentual do fluxo de água salgada que deveria seguir para cada trocador de calor conforme projeto original da planta.

Sendo assim, exemplificando a vazão total projetada para a “condição rotineira” de 302.481 Kg/h conforme Tabela 8, e sabendo que a vazão projetada para o trocador EA-112 é de 122.340 Kg/h de água podemos presumir que da vazão total bombeada, 40,45% segue para o EA-112.

#### 4.4.1 Condição rotineira (*Boill-Off, Flash* e Resfriamento)

Independente da operação em curso os trocadores dos sistemas de *Flash, Boill-Off* e Resfriamento de água doce permanecem com fluxo de água salgada conforme já discutido anteriormente. Devido a isso este processo foi definido como “CONDIÇÃO ROTINEIRA”

onde o fluxo enviado pela bomba do SEGAS no Mirim, é distribuído entre os trocadores EA-112 (*Flash*), EA-108/109/110 (*Boill-Off*) e EA-115A ou B.

Conhecendo a vazão total projetada por operação a partir da Tabela 8 e tendo em mente o processo já discutido em 3.1.2 além da metodologia exposta em 4.4, a parcela da vazão de água por trocador sobre a vazão total a partir dos dados de projeto dos equipamentos é dada pela Tabela 9.

Tabela 9 - Dados de projeto para os trocadores em condição rotineira

| Trocador | Vazão água (Kg/h) | Vazão gás (Kg/h)      | Parcela da vazão total de água (%) |
|----------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| EA-112   | 122.340           | 19.500                | 40,45                              |
| EA-108   | 10.047            | 1.630                 | 3,32                               |
| EA-109   | 10.047            | 1.630                 | 3,32                               |
| EA-110   | 10.047            | 1.630                 | 3,32                               |
| EA-115   | 150.000           | 100.000 <sup>25</sup> | 49,59                              |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

A potência consumida pela bomba nessa condição de operação foi obtida a partir da Equação 13 utilizando os dados coletados pelo analisador de energia conforme explanado em 4.1. Para esta condição operacional foram feitas cinco medições diferentes entre os dias 30/05/2016 e 07/08/2016 gerando os arquivos *trab2*, *teste3*, *reg3*, *trab5* e *trab9*. Para maior precisão das condições e a fim de abranger uma maior variabilidade de situações, os parâmetros elétricos levados em consideração foram obtidos a partir da média aritmética de todas as medições realizadas conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados elétricos do motor da B-0222B em condição rotineira

| Arquivo           | Tensão em V (A/B/C) | Corrente em A (A/B/C) | FP (A/B/C)        | Período            | Operação  |
|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------|
| <i>trab2</i>      | 2330/2330/2330      | 43,83/46,80/43,41     | 0,41/0,408/0,41   | 30/05 à 03/06/2016 | Rotineira |
| <i>teste3</i>     | 2330/2330/2330      | 43,53/46,62/43,31     | 0,405/0,407/0,405 | 03/06 à 13/06/2016 | Rotineira |
| <i>reg3</i>       | 2320/2320/2320      | 43,46/46,74/43,35     | 0,410/0,411/0,410 | 17 à 30/06/2016    | Rotineira |
| <i>trab5</i>      | 2330/2330/2330      | 42,18/45,46/42,17     | 0,396/0,397/0,396 | 19 à 22/07/2016    | Rotineira |
| <i>trab9</i>      | 2320/2320/2320      | 42,73/45,98/42,77     | 0,403/0,409/0,403 | 02 à 07/08/2016    | Rotineira |
| Média geral       | 2326/2326/2326      | 43,15/46,32/43,00     | 0,405/0,406/0,405 | x                  | x         |
| FP <sub>cor</sub> | x                   | x                     | 0,808/0,808/0,808 | x                  | x         |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

<sup>25</sup> Refere-se à vazão de água doce para resfriamento dos compressores restringida pela bomba GA-116.

A potência total medida consumida por hora na operação rotineira foi de 177,893 kVA, destes, 143,770 kW é potência ativa e 104,798 kVAr potência reativa. Detalhes de cálculo podem ser vistos no APÊNDICE B. A operação rotineira atualmente vem demandando 177,893 kVA por hora de energia elétrica, desta apenas 143,770 kW é utilizada para gerar trabalho, ou seja, 80,82% do total.

A bomba que estava em operação durante todas as medições efetuadas foi a B-0222B, durante os registros do analisador o valor da pressão na descarga da bomba foi verificado e registrado manualmente a partir do manômetro instalado na descarga. A média dos valores registrados foi de 6,5 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Utilizando o valor da pressão de descarga e da potência ativa média das operações chegou-se ao valor da vazão média da operação rotineira utilizando as equações 15 e 17. O valor médio de vazão calculado para a B-0222B foi de 539,79 m<sup>3</sup>/h, ou 555.988,5 Kg/h de água salgada.

Aplicando a parcela de vazão total evidenciada na Tabela 9 obteve-se a vazão de água salgada por trocador (Tabela 11).

Tabela 11 - Vazão de água por trocador na condição rotineira

| Trocador | Parcela da vazão total (%) | Vazão de água (Kg/h) | Vazão de água projetada (Kg/h) |
|----------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| EA-112   | 40,45                      | 224.897,3            | 122.340                        |
| EA-108   | 3,32                       | 18.458,82            | 10.047                         |
| EA-109   | 3,32                       | 18.458,82            | 10.047                         |
| EA-110   | 3,32                       | 18.458,82            | 10.047                         |
| EA-115A  | 49,59                      | 275.714,7            | 150.000                        |
| Total    | 100                        | 555.988,5            | 302.481                        |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Além da vazão de água, o fluxo de gás para os trocadores de *Boill-Off* foi necessária para o cálculo de entalpia e por conseguinte eficiência do trocador conforme metodologia descrita em 3.2.2 e 4.2. Para a obtenção deste parâmetro analisou-se a vazão do compressor definida pelo projeto das máquinas GB-103/104 e GB-105.

A fim de ratificar a consideração foi realizada comparação entre a vazão do compressor e a vazão projetada para os trocadores EA-108/109 e EA-110. Uma vez que esses compressores succionam diretamente dos tanques refrigerados e conhecendo o processo já

descrito em 3.1.2, a vazão que segue para os trocadores EA-108/109 ou EA-110, é a mesma vazão succionada pelos compressores GB-103/104 e GB-105 respectivamente.

A partir das vazões definidas de água e gás, os valores de temperatura e pressão necessários para o cálculo da entalpia foram obtidos conforme exposto em 4.1. Devido à dificuldade em obter-se os valores acima citados, uma vez que, muitos deles dependiam da presença no local para medição por câmara térmica, coleta de dados em campo ou a partir do sistema supervisão, foi levantada uma menor quantidade de pontos de medição que podem ser vistas no APÊNDICE C.

A vazão de gás para o trocador EA-112 do processo de *Flash* foi estimada através dos parâmetros de projeto para os compressores GB-101-A/B e GB-101-S em comparação com o referido trocador. Uma vez que esses compressores succionam dos tanques e conhecendo o processo já descrito em 3.1.2, a vazão que segue para o trocador EA-112, é a mesma vazão succionada pelo compressor do tanque refrigerado.

Os parâmetros para o EA-115A/B foram levantados de maneira semelhante, no entanto devido ao menor controle inferido a este sub-processo, os dados de temperatura e pressão foram coletados em sua totalidade por câmara térmica e instrumentos de campo devido à ausência de instrumentos ligado ao sistema supervisão nas linhas de entrada e saída do trocador.

Tratamento especial foi necessário para a vazão de água doce do trocador EA-115A/B. Apesar de o projeto prever uma vazão máxima de água de 140.000 m<sup>3</sup>/h para o equipamento, as duas bombas GA-106 que mantêm o fluxo de água doce para o sistema só têm capacidade de bombear 100 m<sup>3</sup>/h operando conforme descrito em 3.1.3. Portanto a vazão de água doce de projeto para o EA-115 foi restringida em função da capacidade das bombas do sistema.

Os valores de pressão foram coletados a partir de instrumentos instalados no trocador, no entanto, para a pressão de entrada de água doce não há qualquer instrumento que permita a medição do valor. Porém pela configuração da instalação conforme já discutido em 3.1.3, o trocador EA-115 é interligado com o tanque FA-125 que é aberto para a atmosfera. Com isso levou-se em consideração que a pressão de entrada e saída neste trocador é igual à pressão atmosférica no local, que por ser ao nível do mar é de um atm.

A compilação dos valores necessários para a obtenção da eficiência do trocador está resumida no APÊNDICE C e demonstram o valor da entalpia para cada ponto de cada trocador. A partir dos valores obtidos no referido apêndice e da Equação 11, pôde-se chegar a Tabela 12 que evidencia o rendimento médio em cada trocador a partir da média dos

rendimentos em todas as observações. Para o trocador EA-112 foi descartado o valor de rendimento referente ao dia 26/08/2016 devido à discrepância com o valor encontrado em 09/09/2016 associada à incerteza da medição realizada no primeiro evento. Para o EA-115 o rendimento apresentado corresponde a média das duas observações feitas para o trocador.

Tabela 12 - Rendimento médio dos trocadores em condição rotineira

| Trocador | $\eta$ (%) |
|----------|------------|
| EA-108   | 6,4        |
| EA-109   | 34,6       |
| EA-110   | 15,91      |
| EA-112   | 40,86      |
| EA-115   | 37,12      |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

#### 4.4.2 Refrigeração

Para a operação de refrigeração todos os trocadores da condição rotineira permanecem alinhados e em associação o trocador EA-105 deve ser posto em operação conforme fluxo operacional já descrito em 3.1.1.

Como o trocador EA-105 sozinho requer uma vazão de água salgada de 450.000 Kg/h<sup>26</sup> enquanto o total da operação deve ser de 752.481 Kg/h conforme já exposto na Tabela 8, é necessária a operação de mais uma bomba de água salgada que pode ser a B-0225B associada em paralelo com a B-0222B ou apenas a B-0225C conforme já discutido em 3.3.2.

Conhecendo a vazão total projetada para a operação de refrigeração a partir da Tabela 8 e considerando o processo já discutido em 3.1.1 além da metodologia exposta em 4.4, a parcela da vazão de água por trocador sobre a vazão total a partir dos dados de projeto dos equipamentos é dada pela Tabela 13.

<sup>26</sup> Dado de projeto obtido a partir da folha de dados do equipamento.

Tabela 13 - Dados de projeto para os trocadores na refrigeração

| Trocador | Vazão água (Kg/h) | Vazão gás (Kg/h)      | Parcela da vazão total de água (%) |
|----------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| EA-112   | 122.340           | 19.500                | 16,26                              |
| EA-108   | 10.047            | 1.630                 | 1,34                               |
| EA-109   | 10.047            | 1.630                 | 1,34                               |
| EA-110   | 10.047            | 1.630                 | 1,34                               |
| EA-115   | 150.000           | 100.000 <sup>25</sup> | 19,93                              |
| EA-105   | 450.000           | 43.000                | 59,80                              |

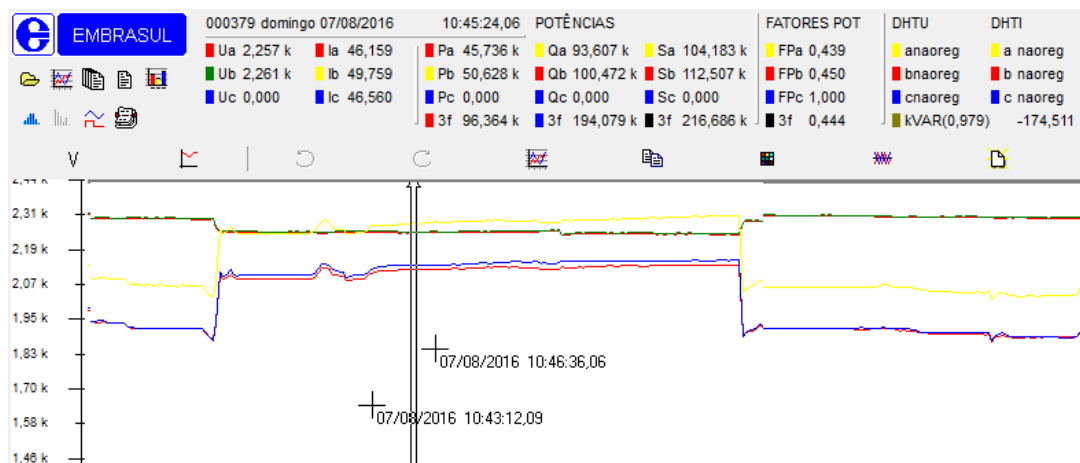
Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Devido à ausência de operações de refrigeração pelos motivos descritos no Capítulo 1, a potência consumida pelas bombas nesta operação não foi obtida a partir de uma operação real. Para simular as condições operacionais quando em refrigeração foi necessário alinhar a água salgada para o trocador EA-105 e partir a B-0225B sem necessariamente haver necessidade operacional real.

Esta ação permitiu o registro do comportamento das bombas nesta condição de operação. Devido ao exposto obteve-se apenas um arquivo de registro no analisador para a refrigeração. Esta simulação da operação ocorreu no dia 07/08/2016 entre 10:43h e 10:46h da manhã e os valores de corrente da B-0222B foram registrados no analisador de energia.

Para a B-0225B os valores elétricos de corrente, fator de potência e tensão foram coletados no painel do CCM de maneira semelhante ao exemplificado na Figura 33 devido à ausência de outro analisador para o registro dos parâmetros.

Figura 38 - Registro da operação de refrigeração simulada



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016) a partir de software ANL6000<sup>19</sup>



A potência total consumida por hora na refrigeração pelas bombas B-0222B e B-0225B foi de 385,460 kVA, destes, 320,466 kW é potência ativa e 214,420 kVAr potência reativa. Detalhes de cálculo podem ser vistos no APÊNDICE B. A refrigeração demanda 385,460 kVA por hora de energia elétrica, desta apenas 320,466 kW é utilizada para gerar trabalho, ou seja, 83,13% do total.

O instrumento na descarga das bombas indicava 6,8 Kgf/cm<sup>2</sup> no momento da simulação. A partir deste parâmetro e dos valores de consumo de energia elétrica por bomba constante no APÊNDICE B, obteve-se uma vazão de 552,14 m<sup>3</sup>/h para a B-0222B e de 597,49 m<sup>3</sup>/h para a B-0225B utilizando-se das equações 15 e 17. As duas bombas em paralelo enviam ao SEGAS 1.184.103,40 Kg/h de água salgada.

O tratamento quanto à submersão e eficiência dos motores e bombas foi considerado o mesmo para a B-0222B e para a B-0225B, uma vez que, tratam-se de bombas e motores de mesma natureza, fabricante e parâmetros como pode ser visto em 3.3.1.

Aplicando a parcela de vazão individual descrita na Tabela 13 obteve-se a vazão de água salgada por trocador (Tabela 14).

Tabela 14 - Vazão de água por trocador na refrigeração

| Trocador            | Parcela da vazão total (%) | Vazão de água (Kg/h) | Vazão de água projetada (Kg/h) |
|---------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| EA-112              | 16,26                      | 192.514,11           | 122.340                        |
| EA-108              | 1,34                       | 15.809,95            | 10.047                         |
| EA-109              | 1,34                       | 15.809,95            | 10.047                         |
| EA-110              | 1,34                       | 15.809,95            | 10.047                         |
| EA-115 <sup>a</sup> | 19,93                      | 236.039,86           | 150.000                        |
| EA-105              | 59,80                      | 708.119,58           | 450.000                        |
| <b>Total</b>        | <b>100</b>                 | <b>1.184.103,40</b>  | <b>752.481</b>                 |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

De maneira semelhante ao realizado para a condição rotineira a vazão de gás para o trocador foi estimada a partir do projeto dos compressores GB-102A,B e GB-102S tomando-se como parâmetro o fluxo operacional do gás para o trocador descrito em 3.1.1.

Os parâmetros de eficiência para os trocadores da condição rotineira não se alteram na operação de refrigeração e podem ser considerados os mesmos somente com a alteração da vazão de água conforme discutido e concluído em 3.2.2.

Os parâmetros utilizados para o cálculo das entalpias referentes ao trocador podem ser visualizados no APÊNDICE C e para o EA-105 refletem uma operação teste ocorrida no dia 18/05/2016 entre 11:20h e 17:20h e uma operação excepcional de *Flash* com o EA-105 ocorrida no dia 12/08/2016, a qual os valores de temperatura e pressão foram coletados a partir do sistema supervisor e câmara térmica. Para a operação do dia 18/05/16 os parâmetros da água salgada não foram coletados o que levou a desconsideração desta medição.

A partir das observações válidas na operação do EA-105 obteve-se rendimento de 68,7% para a troca térmica no equipamento.

#### 4.4.3 Aquecimento de GLP

A operação de aquecimento não ocorre em concomitância com a operação de refrigeração ou regeneração. Devido à lógica operacional, se é necessário retirar produto do tanque é muito improvável que haja um ressuprimento do mesmo através da refrigeração.

Os dados de projeto do trocador preveem uma vazão de GLP para aquecimento de 178.500 Kg/h e de 529.328 Kg/h de água salgada, a partir da Tabela 8 e dos valores individuais a parcela de água salgada necessária na operação de aquecimento foi obtida de maneira semelhante aos outros processos e está demonstrada na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados de projeto para os trocadores no aquecimento de GLP

| Trocador | Vazão água (Kg/h) | Vazão gás (Kg/h)      | Parcela da vazão total de água (%) |
|----------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| EA-112   | 122.340           | 19.500                | 14,71                              |
| EA-108   | 10.047            | 1.630                 | 1,21                               |
| EA-109   | 10.047            | 1.630                 | 1,21                               |
| EA-110   | 10.047            | 1.630                 | 1,21                               |
| EA-115   | 150.000           | 100.000 <sup>25</sup> | 18,03                              |
| P-0301   | 529.328           | 178.500               | 63,64                              |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Mais uma vez, assim como na refrigeração, mostra-se necessária a operação da B-0225B em paralelo a B-0222B ou apenas da B-0225C em virtude da vazão de água salgada necessária para a troca térmica.

Assim como ocorreu no caso da refrigeração onde a ausência de operações interferiu na quantidade de resultados obtidos, houve poucas oportunidades de acompanhar operações de aquecimento. No período estudado ocorreram apenas duas operações de aquecimento nos dias 20 à 21/05/2016 e 14/06/2016. A obtenção dos parâmetros elétricos foi feita de maneira simulada assim como na refrigeração, uma vez que para a operação dos dias 20 à 21/05/2016 o analisador de energia ainda não estava instalado e para o dia 14/06/2016 a operação ocorreu de forma não convencional com apenas a B-0222B em operação.

Para viabilizar o fluxo necessário de água salgada para a troca térmica na operação do dia 14/06/2016 houve a restrição do fluxo para o trocador EA-112 em 50% e o bloqueio para os trocadores de *Boill-Off*. Devido a este fato, os valores elétricos desta operação não foram considerados na análise.

A simulação da operação ocorreu no dia 07/08/2016 entre 10:34h e 10:39h da manhã e os valores de corrente da B-0222B foram registrados no analisador de energia. Para a B-0225B os valores elétricos de corrente, fator de potência e tensão foram coletados de maneira semelhante ao que já fora exposto na simulação da refrigeração.

A potência total consumida por hora na operação de aquecimento de GLP pelas bombas B-0222B e B-0225B foi de 381,507 kVA, destes, 316,168 kW é potência ativa e 213,357 kVAr potência reativa. Detalhes de cálculo podem ser vistos no APÊNDICE B. O aquecimento de GLP demanda 381,507 kVA por hora de energia elétrica, desta apenas 316,168 kW é utilizada para gerar trabalho, ou seja, 82,87% do total.

O instrumento na descarga das bombas indicava 6,9 Kg/cm<sup>2</sup> no momento da simulação, considerando as mesmas premissas da operação de refrigeração quanto ao comportamento dos motores e bombas e a partir da pressão de descarga e dos valores de consumo de energia elétrica por bomba constante no APÊNDICE B, obteve-se uma vazão de 534,55 m<sup>3</sup>/h para a B-0222B e de 583,05 m<sup>3</sup>/h para a B-0225B utilizando-se das equações 15 e 17. As duas bombas em paralelo estão enviando ao SEGAS 1.151.132,30 Kg/h de água salgada.

A obtenção da vazão deu-se da mesma maneira que nas outras operações e a vazão por trocador no aquecimento de GLP pode ser consultada na Tabela 16.

Tabela 16 - Vazão de água por trocador no aquecimento de GLP

| Trocador | Parcela da vazão total (%) | Vazão de água (Kg/h) | Vazão de água projetada (Kg/h) |
|----------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| EA-112   | 14,71                      | 169.305,12           | 122.340                        |
| EA-108   | 1,21                       | 13.903,945           | 10.047                         |
| EA-109   | 1,21                       | 13.903,945           | 10.047                         |
| EA-110   | 1,21                       | 13.903,945           | 10.047                         |
| EA-115A  | 18,03                      | 207.583,53           | 150.000                        |
| P-0301   | 63,64                      | 732.531,82           | 529.328                        |
| Total    | 100                        | 1.151.132,30         | 831.809                        |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Com foco no cálculo da entalpia e conhecendo o processo já apresentado em 3.1.4, a vazão de gás para o trocador P-0301 foi considerada como sendo o volume retirado na operação dos dias 20 à 21/05/2016 e na operação do dia 14/06/2016 pelas bombas GA-106. Este volume foi mensurado conhecendo-se as dimensões dos tanques e a partir das medições de nível de produto antes e depois da operação. Para a primeira operação a vazão foi de 208,7 m<sup>3</sup>/h de GLP líquido, a densidade do produto do tanque naquela oportunidade era de 612 Kg/m<sup>3</sup>, sendo assim a vazão mássica da operação foi de 127.724,4 Kg/h. Na segunda oportunidade a vazão foi de 179.188 Kg/h utilizando o mesmo raciocínio.

Os parâmetros utilizados para o cálculo das entalpias referentes ao trocador podem ser visualizados no APÊNDICE C. Foram tomadas como base as operações dos dias 20/05/2016 e 14/06/2016 e os valores de temperatura e pressão para o GLP foram obtidos a partir do sistema supervisor do SEGAS.

Houve grande dificuldade em obter os parâmetros para a água salgada devido à inexistência de instrumentos neste subsistema associada à escassez de operações já discutida, portanto, a temperatura e pressão de entrada foram obtidas a partir da linha de admissão geral de água salgada no SEGAS. Para a temperatura de saída de água nenhuma medição foi possível, sendo assim utilizou-se a temperatura mais provável na visão dos operadores e da Coordenadora Técnica da unidade<sup>17</sup>.

A partir da média das observações possíveis na operação do P-0301 obteve-se rendimento de 67,36% para a troca térmica no equipamento.

#### 4.4.4 Regeneração

A operação de regeneração no tocante ao consumo de água salgada é uma extensão da operação de refrigeração com a adição do trocador EA-116 conforme já discutido em 3.1.5.

Para o EA-116 o projeto previa uma vazão de água salgada de 42.258 Kg/h e para o GLP 14.300 Kg/h, da mesma forma que nos subcapítulos anteriores a parcela de água sobre o montante necessário para a operação por trocador pode ser observada na Tabela 17.

Tabela 17 - Dados de projeto para os trocadores na regeneração

| Trocador | Vazão água (Kg/h) | Vazão gás (Kg/h)      | Parcela da vazão total de água (%) |
|----------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| EA-112   | 122.340           | 19.500                | 15,39                              |
| EA-108   | 10.047            | 1.630                 | 1,26                               |
| EA-109   | 10.047            | 1.630                 | 1,26                               |
| EA-110   | 10.047            | 1.630                 | 1,26                               |
| EA-115   | 150.000           | 100.000 <sup>25</sup> | 18,87                              |
| EA-105   | 450.000           | 43.000                | 56,62                              |
| EA-116   | 42.258            | 14.300                | 5,32                               |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016) a partir de dados técnicos.

Da mesma maneira que na refrigeração e aquecimento de GLP não houveram operações no período estudado, a despeito do que ocorreu na refrigeração e no aquecimento nem uma operação sequer foi solicitada impossibilitando a análise de campo da eficiência do trocador EA-116. Entrevistas foram realizadas dentre os operadores para tentar obter-se os dados baseados na experiência dos mesmos, no entanto, devido ao controle deficiente no subprocesso de água salgada os parâmetros para pressão e temperatura de água na entrada e saída do trocador não são conhecidos, tampouco há histórico ou instrumentos dedicados a estes pontos.

Devido ao exposto a entalpia para o cálculo da eficiência do EA-116 será obtida a partir dos valores de projeto constantes na folha de dados do trocador e que podem ser visualizadas no APÊNDICE C.

Os parâmetros elétricos mais uma vez foram observados de maneira simulada no dia 07/08/2016 das 10:50h às 11:00h. O consumo elétrico por hora de energia de ambas as bombas foi de 385,957 kVA, sendo que destes 321,262 kW é potência ativa e 214,119 kVAr é potência reativa. Dos 385,957 kVA demandados da rede elétrica apenas 321,262 kW é

utilizado para gerar trabalho no eixo do motor, ou seja, 83,23% do total. Detalhes do cálculo podem ser visualizados no APÊNDICE B.

A pressão no header de descarga das bombas era de 6,7 Kgf/cm<sup>2</sup> observada a partir do instrumento de campo. Seguindo a mesma metodologia, parâmetros e equações dos itens anteriores chegou-se aos valores de 563,52 m<sup>3</sup>/h para a vazão da B-0222B e 606,32 m<sup>3</sup>/h para a B-0225B. As duas bombas em paralelo estão enviando ao SEGAS 1.204.936,90 Kg/h de água salgada.

A partir da metodologia aplicada nos itens anteriores, da vazão mássica acima e dos valores já conhecidos da Tabela 8 pode-se estimar a vazão por trocador.

Tabela 18 - Vazão de água por trocador na regeneração

| Trocador     | Parcela da vazão total (%) | Vazão de água (Kg/h) | Vazão de água projetada (Kg/h) |
|--------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| EA-112       | 15,39                      | 185.484,77           | 122.340                        |
| EA-108       | 1,26                       | 15.232,675           | 10.047                         |
| EA-109       | 1,26                       | 15.232,675           | 10.047                         |
| EA-110       | 1,26                       | 15.232,675           | 10.047                         |
| EA-115A      | 18,87                      | 227.421,25           | 150.000                        |
| EA-105       | 56,62                      | 682.263,74           | 450.000                        |
| EA-116       | 5,32                       | 64.069,114           | 42.258                         |
| <b>Total</b> | <b>100</b>                 | <b>1.204.936,90</b>  | <b>794.739</b>                 |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

A vazão de gás que passa pelo trocador EA-116 é a mesma vazão que passa pelo forno BA-102 mais a parcela de água absorvida na torre de regeneração conforme fluxograma de processo visualizado em 3.1.5. No referido item é exposto que a vazão do forno deve variar entre 5.000 a 6.000 Kg/h, no entanto a parcela de água absorvida no processo não pode ser mensurada devido à ausência de dados técnicos e de projeto para o processo. Neste tocante assumiremos a maior vazão projetada (6.000 Kg/h) entendendo como normal para o processo a condição de média vazão de gás advindo do forno. Neste caso o maior valor compensaria a parcela evaporada de água da torre.

Da mesma maneira anteriormente assumida; a eficiência dos trocadores calculada na condição rotineira e refrigeração é ainda válida para o estudo, tomando como premissas os erros assumidos como plausíveis em caráter experimental de acordo com o que foi discutido em 3.2.2.

#### 4.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TROCA TÉRMICA

Observando os dados do APÊNDICE C percebe-se o comportamento não esperado para os trocadores, especialmente nos equipamentos da operação “condição rotineira”. É percebida uma maior troca térmica para o gás do que para a água salgada, ou seja, o fluxo de energia perdida pelo gás é muito maior do que a energia absorvida pela água.

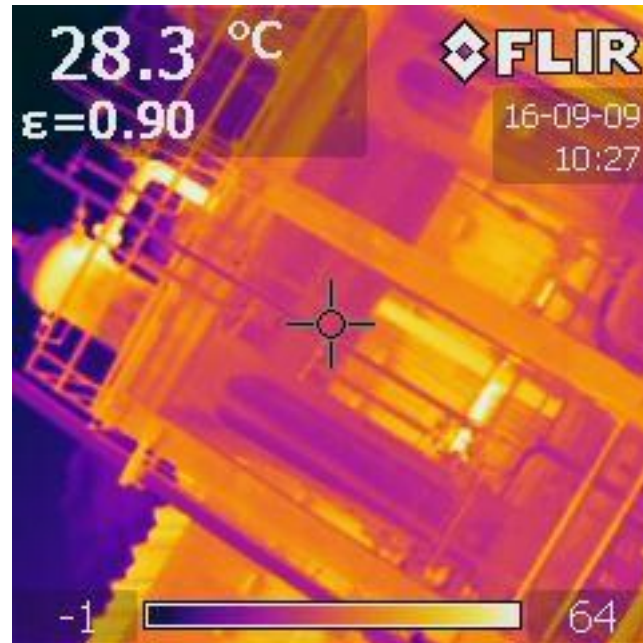
Era de se esperar que o rendimento apresentasse parâmetros que se refletissem na maior temperatura na água de saída. Através da análise das condições percebeu-se que os trocadores de calor apresentam alta troca térmica para o ambiente de maneira que a água absorve apenas uma pequena parcela da energia perdida pelo GLP.

É natural que a redução da eficiência dos trocadores de calor venha associada a uma necessidade cada vez maior de fluxo de água para compensar fatores como incrustação, velocidade de escoamento dentre outros (2.3.1), no entanto, com o fenômeno percebido nos trocadores do SEGAS de alta troca ambiente, é possível a redução da vazão de água aumentando assim a eficiência do processo de bombeamento sem necessariamente resultar numa maior eficiência do trocador.

Os valores de projeto para os trocadores preveem uma eficiência média de 91% com maior fluxo térmico na água salgada, este efeito não foi percebido nas análises de campo. Suspeitava-se ter contribuído para o comportamento a metodologia de medição diferenciada entre água salgada e GLP. Como os valores de temperatura de GLP foram coletados por instrumentos enquanto para a água estes valores foram provenientes de câmera térmica, pode ter havido algum tipo de inconsistência entre as medições. No intuito de descartar esta tese, antes das medições com câmera térmica foram feitas comparações pontuais entre os valores encontrados nos termômetros do processo e na câmera e não foram detectadas grandes discrepâncias.

Portanto confia-se na hipótese de alto fluxo de calor do GLP para o ambiente, hipótese esta que pode ser confirmada através da foto térmica externa do EA-112 (Figura 39). Nesta percebe-se que o gás encontra-se em alta temperatura na entrada do trocador (parte superior), no entanto, já alguns metros abaixo da entrada, esta temperatura já está dissipada e nas mesmas condições de saída do equipamento.

Figura 39 - Distribuição de temperaturas externas do EA-112



Fonte: Fotografia retirada pelo autor desta dissertação (2016).

Este comportamento permite aumentar ainda mais a eficiência do processo, a troca térmica para o ambiente é possível devido à característica do trocador em que o GLP passa pelo casco e a água pelos tubos, com isso, e sabendo que o trocador não é isolado termicamente do ambiente, a condutividade térmica do aço de construção do casco do equipamento viabiliza o efeito.



## **5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO E VIABILIDADE FINANCEIRA DE IMPLEMENTAÇÃO**

A eficiência energética do processo foi baseada em dois pilares principais, eficiência termodinâmica dos trocadores de calor que irá refletir em eficiência elétrica do motor da bomba de água salgada.

A partir das premissas assumidas e tendo como foco o desenvolvimento desses dois processos principais com um mínimo de gasto energético e atendendo as expectativas do processo, chegou-se ao valor tido como ótimo para o dispêndio energético da troca térmica.

Questões operacionais também serão revistas tais como o bloqueio dos trocadores quando em condição de espera, bem como, sugestões para controles motorizados das válvulas de admissão de água.

Vale salientar que a eficiência termodinâmica foi obtida com o objetivo de racionalizar o consumo de energia elétrica do motor da bomba de água salgada do Mirim. No entanto, pode e certamente promoverá economias com a manutenção de moto-bombas e trocadores, uma vez que, a velocidade de rotação do conjunto moto-bomba será reduzida e a vazão de água salgada para o trocador de calor também o será. Isto promoverá menor taxa de incrustação e, por conseguinte aumento da eficiência de troca térmica do equipamento (AWAD, 2011).

Por fim a viabilidade financeira do investimento será calculada pelo método do VPL, levando-se em consideração a taxa de juros cobrada pelo mercado para investimentos deste tipo e os custos necessários para a implementação do inversor. Várias linhas de empréstimo são possíveis com taxas variáveis, sendo que as possibilidades serão expostas e o tempo de retorno calculado com base na economia esperada com energia elétrica.

### **5.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA TROCA TÉRMICA**

Com a comparação entre os valores de vazão de água salgada projetado e realizado nos processos analisados percebeu-se que as vazões de água estavam demasiadamente maiores do que o solicitado pelo trocador (Tabela 11, Tabela 14, Tabela 16, Tabela 18).

A eficiência de um trocador de calor é a razão entre o calor trocado entre o fluido quente e frio (Equação 11); sendo assim quanto maior o calor trocado pelo fluido quente e menor o calor trocado pelo fluido frio mais eficiente será o trocador.

Entre os nove trocadores envolvidos na pesquisa, seis são condensadores, ou seja, têm a função de condensar o gás de entrada em líquido saturado na saída. Com isso percebeu-se que a natureza do equipamento e a necessidade do projeto previam que o fluido de saída estivesse na condição de líquido saturado na pressão de entrada.

Através do software ProPhyPlus, foi possível obter a temperatura de liquefação total do gás em cada estado analisado. Com isso, pôde-se perceber que a temperatura ótima de saída de gás se mostrou demasiadamente elevada quando em comparação as temperaturas obtidas.

Tabela 19 - Temperaturas assumidas do gás para efficientização

| Trocador | Condição de entrada |                                | T <sub>sai</sub> medida (°C) | T <sub>sai</sub> ProPhyPlus (°C) | T <sub>sai</sub> FD (°C) |
|----------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
|          | Temperatura (°C)    | Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> ) |                              |                                  |                          |
| EA-108   | 95,42               | 13,49                          | 29,8                         | 62,15                            | 33                       |
| EA-109   | 105,71              | 11,13                          | 35,1                         | 59,36                            | 33                       |
| EA-110   | 106,01              | 15,03                          | 41,54                        | 73,77                            | 33                       |
| EA-112A  | 94,95               | 13,14                          | 28,8                         | 60,04                            | 33                       |
| EA-112B  | 92,78               | 15,44                          | 29,6                         | 59,33                            | 33                       |
| EA-105   | 81,61               | 13,71                          | 30,4                         | 56,0                             | 33                       |
| P-0301A  | -25,29              | 8,17                           | 15,81                        | 10*                              | 5                        |
| P-0301B  | -24,62              | 12,44                          | 12,47                        | 10*                              | 5                        |

\*Temperatura obtida para condições mecânicas das esferas  
 \*\*EA-116 não foi considerado por não ter sido analisado em operação  
 \*\*\*EA-115 não considerado, pois não é condensador

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

A curva de resfriamento e condensação anexa à folha de dados do trocador EA-112 leva em consideração uma concentração molar de 84% de Butano e 16% de etano. Para os trocadores EA-108/09 e EA-110 a concentração assumida pela folha de dados é de 90% butano e 10% etano, ambas as composições não estão em alinhamento com a concentração real do GLP (Tabela 4) e promoveram a discrepância visualizada entre a temperatura de liquefação e a temperatura de saída do trocador na folha de dados do mesmo (T<sub>sai</sub> FD).

Para o EA-105 não foi encontrada a curva de condensação.

Para o EA-115, assumiu-se que a temperatura ótima para a saída de água doce do trocador é a temperatura ambiente, ou seja, **25°C**.

Para o P-0301 foi assumida como temperatura ideal da saída a mínima temperatura permitida para as esferas de destino conforme entendimento do processo já discutido em 3.1.4. Este valor foi coletado da documentação técnica de projeto das três esferas do SEGAS que, admitem temperaturas operacionais mínimas de **10°C**. Temperaturas abaixo desta poderiam fragilizar o aço das esferas ocasionando risco de colapso do material, uma vez que, possuem temperatura de transição dúctil-frágil<sup>27</sup> relativamente elevada.

A despeito da otimização proposta para a temperatura do gás, a Resolução CONAMA 430/2011 determina que a temperatura de descarte de água para os mananciais marinhos deve ser inferior a 40°C e possuir uma diferença de 3°C para mais ou para menos com referência a temperatura de coleta.

Com isso, apesar das necessidades de projeto admitirem altas temperaturas de saída que aumentariam a eficiência do processo, a legislação brasileira não permite o descarte de água quente para os mananciais naturais. Sendo assim, a temperatura de saída de água dos trocadores deverá ser fixada com acréscimo de 3°C para os trocadores que aquecem a água e decréscimo de 3°C para os trocadores que a resfriam.

## 5.2 POTENCIAL DE ECONOMIA

A partir dos valores energéticos necessários tendo em vista a legislação e as necessidades de processo, pode-se chegar aos valores financeiros que podem ser economizados por operação.

No entanto para melhor visualização do potencial econômico e para o cálculo do tempo de retorno dos investimentos é necessário ter-se um valor temporal, ou seja, o valor de economia por mês.

Desde o segundo semestre de 2015 a quantidade de operações e o volume de GLP armazenado no SEGAS diminuiu consideravelmente devido à crise financeira que acometeu o Brasil conforme já discutido no capítulo 1. Desde que as operações do SEGAS começaram a ser monitoradas a fim de obter parâmetros para o estudo em maio de 2016 até o fim das medições em setembro do mesmo ano, ocorreu apenas uma refrigeração e ainda assim em caráter experimental no dia 18/05/2016 das 11h20 às 17h20.

Se este cenário for levado em consideração, o potencial de eficiência energética seria gigantesco, já que, neste período a necessidade de operações básicas e rotineiras foi quase

---

<sup>27</sup> Temperatura abaixo da qual um material com relativa elasticidade se torna frágil e quebradiço.

nula e ainda assim o motor da B-0222B continuou operando em velocidade nominal. No entanto, apesar dos resultados serem amplificados nesta condição eles não refletiriam a realidade do processo, uma vez que as operações retomem o seu ritmo normal, os valores calculados não seriam mais válidos e a conclusão do trabalho estaria seriamente comprometida.

Devido ao exposto assumiu-se como condição de parametrização o fluxo normal de operações mensais de acordo com o histórico do SEGAS. A condição operacional atual será demonstrada apenas como ilustração do potencial de eficiência. Caso existam novos períodos com baixo fluxo de operações, esta pode ser útil para a tomada de decisão.

### 5.2.1 Consumo energético atual

No ano de 2015 o SEGAS refrigerou uma média de 16.800 m<sup>3</sup> de GLP por mês, conhecendo-se as vazões máxima e real apresentadas em 3.1.1, pode-se assumir uma vazão média de 130 m<sup>3</sup>/h. Portanto por mês o SEGAS mantém sua condição de refrigeração por **129 horas e 14 minutos**.

Sabe-se, conforme discutido em 3.1.5, que a cada 14.000 m<sup>3</sup> é necessário regenerar a torre de secagem em operação, portanto por mês são necessárias 1,2 regenerações ou seis operações de regeneração a cada cinco meses.

A duração da operação depende da quantidade de água absorvida pela torre, que por sua vez, tem dependência direta da qualidade do GLP recebido. Devido à dificuldade de mensurar tal quantidade e tempo de operação utilizou-se como base a média temporal da operação que é de 15 horas<sup>17</sup>. Outra observação importante é que toda regeneração requer necessariamente que a operação de refrigeração esteja em curso (3.1.5), portanto o tempo das operações de refrigeração deve ser abatido do tempo mensal das operações de regeneração, considerado como 1,2 vezes o tempo da operação. Com este novo parâmetro das 129 horas e 14 minutos mensais em refrigeração **18 horas** a operação de regeneração também estará em curso.

O aquecimento de GLP é uma operação que ocorre quando há a necessidade de aquecer um produto já refrigerado em virtude de restrições do cliente recebedor. Como esta operação é inesperada e depende da logística de venda, foi considerada a média das operações entre Janeiro e Junho de 2015. Nesse período foram aquecidos 36.285 m<sup>3</sup> de GLP o que gera uma média de 6.349,14 m<sup>3</sup> por mês. O sistema permaneceu em operação por 249 horas e 33

minutos, com uma média de **43 horas** mensais de operação tomando-se os 180 dias analisados e um mês de 31 dias.

Tomando-se como parâmetros os valores de potência ativa levantados nos itens 4.4.1 à 4.4.4 e um mês de 31 dias com horário de ponta para o consumo de energia elétrica entre 18 e 21 horas<sup>28</sup> nos dias de semana, o consumo por operação e total mensal de energia elétrica pelas bombas de água salgada pode ser resumido na Tabela 20.

Tabela 20 - Energia consumida por operação por mês

| Operação                        | Tempo de operação/mês (h) | Energia consumida/mês (kWh) | Custo da energia consumida/mês (R\$) |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Refrigeração                    | 111,23                    | 35.645,43                   | 9.867,56                             |
| Aquecimento de GLP              | 43                        | 13.595,22                   | 3.763,50                             |
| Regeneração                     | 18                        | 5.782,72                    | 1.600,80                             |
| Condição rotineira (Fora Ponta) | 551,77                    | 79.327,97                   | 21.959,99                            |
| Condição rotineira (Ponta)      | 63                        | 9.057,51                    | 3.838,79                             |
| <b>Total mensal</b>             | <b>744</b>                | <b>143.408,85</b>           | <b>41.030,64</b>                     |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

A energia consumida por mês foi calculada através da multiplicação da potência ativa com o tempo de operação.

As premissas utilizadas no cálculo levaram em consideração as ações de eficiência já realizadas pela operação do SEGAS quanto a não realizar operações de alto consumo energético durante o horário de ponta. Sendo assim, o custo das operações de refrigeração, regeneração e aquecimento de GLP foram calculadas usando a tarifa fora da ponta que pode ser visualizada no ANEXO D.

Não há dispêndio mensal com reativos como pode ser visto no ANEXO D, uma vez que o TEMADRE é provido de banco de capacitores que tem a função de absorver esse efeito de modo a não provocar maiores danos aos equipamentos interligados à rede nem promover pagamento extra à concessionária.

Para os dias sem horário de pico, foi levado em consideração além dos finais de semana, a quantidade de feriados no ano de 2016. A média de dias não úteis foi de 9,51 dias por mês, portanto dos 31 dias mensais foram considerados 10 dias sem horário de pico.

<sup>28</sup> Horário de ponta no estado da Bahia. Obtido em < <http://servicos.coelba.com.br/residencial-rural/Pages/Alta%20Tens%C3%A3o/opcoes-tarifarias.aspx> Acesso em 25/09/2016 às 13:05.

## 5.2.2 Consumo energético após ações de eficiência

Após a instalação do inversor é esperado que haja controle da rotação da bomba para valores ótimos ao processo. Estes valores conforme já discutido em 2.2.1 levarão a eficiência energética e, por conseguinte, redução dos custos. Eficiência energética vem sendo o foco do setor industrial no momento.

Depois de assumidas as premissas de eficiência da troca térmica do processo já apresentadas em 5.1, foi possível chegar a novos valores de entalpia para a saída dos fluidos nas mesmas condições de entrada já discutidas e expostas no APÊNDICE C. Com o conhecimento da eficiência dos trocadores (4.4.1 à 4.4.4), mantendo as condições iniciais e alterando as condições de saída (exceto para pressão) com foco nas condições de processo e ambientais chegou-se a vazão mássica necessária de água por trocador utilizando mais uma vez a Equação 11.

Tabela 21 - Vazão necessária de água salgada

| Trocador | Operação           | Temp. saída água (°C) | Temp. saída gás (°C) | $\eta$ (%) | Vazão necessária de água (Kg/h) | Vazão atual de água (Kg/h) |
|----------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------|---------------------------------|----------------------------|
| EA-108   | 26/08/16           | 29,8                  | 62,15                | 6,41       | 7.117                           | 18.458,82                  |
| EA-109   | 05/07/16           | 29,4                  | 59,36                | 34,58      | 18.302                          | 18.458,82                  |
| EA-110   | 18/05/16           | 31,6                  | 73,77                | 15,91      | 7.346,58                        | 18.458,82                  |
| EA-112   | 26/08/16           | 29,6                  | 60,04                | 9,58       | 112.121                         | 224.897,3                  |
| EA-115   | 18/05 e 26/08/16   | 27,9 e 28,4           | 25*                  | 37,11      | 51.815,47                       | 275.714,7                  |
| EA-105   | 12/08/2016         | 31,6                  | 56                   | 68,7       | 762.176                         | 708.119,58                 |
| P-0301   | 20/05 e 14/06/2016 | 24                    | 10                   | 67,36      | 651.937,29                      | 732.531,82                 |
| EA-116   | PROJETO            | 23                    | 30                   | 42,3       | 48.262                          | 64.069,114                 |

\*Refere-se a água doce

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Entre as operações monitoradas (APÊNDICE C) no que se refere à eficiência e parâmetros do trocador EA-112 foi levada em consideração a operação do dia 26/08/2016 devido a sua característica mais real com dois compressores em operação. Para o EA-115 levou-se em consideração a média das duas operações observadas. Para o P-0301 levou-se em consideração, também, a média das duas operações observadas. Para o EA-116 foram levadas em consideração as condições iniciais de projeto e foram adequadas as condições de saída.

Na Tabela 21 a coluna “Vazão atual de água (Kg/h)” demonstra as vazões atuais calculadas e expressas nas Tabela 11, Tabela 14, Tabela 16 e Tabela 18. Para os trocadores EA-108, 109, 110, 112 e EA-115 foram expressos apenas as vazões quando em condição

rotineira. A coluna “Temp. saída água (°C)” e “Temp. saída gás (°C)” demonstram as condições de saída já eficientizadas para o processo.

É perceptível que valores necessários para vazão de água por processo são significativamente menores que os atualmente praticados. Na condição rotineira a vazão total necessária de água salgada passou de 555.988,5 Kg/h para **196.702,05 Kg/h**. Na refrigeração a vazão necessária é de **958.878,05 Kg/h** contra 1.184.103,40 Kg/h na condição atual. Na regeneração a vazão necessária é de **1.007.140,05 Kg/h** em face de 1.204.936,90 Kg/h utilizados atualmente. Para o aquecimento de GLP a vazão necessária será de **848.639,34 Kg/h** quando atualmente são utilizados 1.151.132,30 Kg/h de água salgada.

Estes valores levam em consideração apenas a otimização e controle das condições operacionais dos fluidos, nenhuma alteração de bloqueio ou alinhamento de trocadores de calor está exprimida nos números expostos no parágrafo anterior, ainda assim percebe-se uma redução significativa de necessidade de água e, por conseguinte, de energia elétrica.

Sendo assim e a partir da Equação 19 pode-se chegar à potência atual necessária por operação, conhecendo-se o tempo médio de operações por mês (Tabela 20) bem como o custo com energia elétrica.

Tabela 22 - Energia necessária por operação

| Operação                           | Energia mensal consumida atual (kWh) | Expectativa consumo mensal com inversor (kWh) | Custo mensal da energia atual (R\$) | Expectativa de custo mensal com inversor |
|------------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|--|
| Refrigeração                       | 35.645,43                            | 18.928,89                                     | 9.867,56                            | 5.239,99                                 |
| Aquecimento de GLP                 | 13.595,22                            | 5.447,28                                      | 3.763,50                            | 1.507,94                                 |
| Regeneração                        | 5.782,72                             | 3.376,82                                      | 1.600,80                            | 934,79                                   |
| Condição rotineira (Fora de ponta) | 79.327,97                            | 3.512,82                                      | 21.959,99                           | 972,44                                   |
| Condição rotineira (Ponta)         | 9.057,51                             | 401,08  | 3.838,79                            | 169,99                                   |
| <b>Total Mensal</b>                | <b>143.408,85</b>                    | <b>31.666,89</b>                              | <b>41.030,64</b>                    | <b>8.825,16</b>                          |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

As ações propostas se implementadas, trarão economia anual de R\$ 386.465,76. Obviamente o custo de aquisição e instalação dos equipamentos deve ser levado em consideração, para a análise de viabilidade conforme será demonstrado no item 5.4.

### 5.3 ALTERNATIVA COM BLOQUEIO DOS TROCADORES

Para tornar as ações ainda mais expressivas e eficientes, além da instalação do inversor de frequência pode-se bloquear a passagem de água salgada pelos trocadores que não estiverem sendo demandados pela operação.

Esta ação apesar de parecer óbvia, pode trazer impactos operacionais por causa do tempo necessário para acionamento e abertura da válvula de água salgada pelo operador na área. Os sistemas de *Flash* e *Boill-Off* podem ser demandados com certa brevidade devido ao aumento súbito da pressão dos tanques refrigerados. Caso não haja tempo para a abertura da válvula manual de admissão de água salgada e posterior partida do sistema, a pressão do tanque pode ultrapassar o limite operacional provocando abertura da PSV<sup>29</sup> para a tocha de segurança e/ou para a atmosfera levando assim a um incidente de segurança de processo.

Conforme já discutido em 3.3.2, todos os trocadores de *Flash* e *Boill-Off* permanecem alinhados todo o tempo. Uma alternativa que reduziria sensivelmente o consumo de energia elétrica do sistema é bloquear a água salgada para o trocador após a instalação do inversor de frequência na bomba do Mirim.

Para estudar a efetividade desta implementação, foi analisada a condição rotineira no período entre Janeiro e Junho de 2015 e entre 18/05/16 e 09/09/16 (APÊNDICE E) que é o período de medições do presente trabalho. Foram coletados dados completos de 180 e 114 dias, o que corresponde a 5,8 e 3,7 “meses” de 31 dias para o primeiro e segundo períodos consecutivamente.

As operações de refrigeração, aquecimento e regeneração não foram analisadas haja vista, que já contemplam como comportamento operacional o bloqueio dos trocadores que não estão em operação.

Com estas análises serão contempladas as duas condições de fluxo operacional da planta de GLP do TEMADRE, o primeiro período representa o fluxo normal de armazenamento e operações e o segundo o baixo fluxo provocado pela condição do país em 2016.

A condição operacional do trocador foi obtida a partir da coleta no sistema supervisorio do SEGAS do histórico da pressão de entrada dos trocadores. A partir desta informação os períodos de operação por trocador foram obtidos (APÊNDICE E) e o total de horas operadas foi resumido na Tabela 23.

---

<sup>29</sup> Sigla para “Pressure Safety Valve”. Válvula com abertura controlada pela pressão interna de um sistema e cuja função é evitar o alcance da pressão de colapso do equipamento ou da operação.



Tabela 23 - Necessidade de trocadores em condição rotineira

| Trocador | Jan-Jun/2015 (h) | 18/05-09/09/16 (h) | Média mensal 2015 (h) | Média mensal 2016 (h) |
|----------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| EA-108   | 3738:20          | 1435:30            | 644,54                | 387,97                |
| EA-109   | 98:10            | 776:50             | 16,92                 | 209,95                |
| EA-110   | 0                | 203:50             | 0                     | 55,09                 |
| EA-112   | 2915             | 314:50             | 502,58                | 85,09                 |

Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Conclui-se que em 2015 não houve necessidade de operação em condição rotineira completa, ou seja, o trocador EA-110 não foi demandado neste período devido ao compressor GB-105 estar em manutenção (3.1.2).

Sendo assim a necessidade de energia elétrica e vazão de água levando em consideração os dados otimizados da Tabela 21 para o período de Janeiro a Junho de 2015 seria de **557,53 kWh** referente a **189.355,47 Kg/h** durante as **98 horas e 10 minutos** em que os trocadores EA-108, EA-109, EA-112 e EA-115 estavam em operação; **11.792,95 kWh** referente a **151.053,47 Kg/h** durante as **2.816 horas e 50 minutos** em que os trocadores EA-108, EA-112 e EA-115 estavam em operação e **140,95 kWh** referente a **58.932,47 Kg/h** durante as **823 horas e 20 minutos** em que os trocadores EA-108 e EA-115 estavam em operação.

Utilizando a mesma metodologia até então empregada, o consumo total necessário de energia elétrica pela bomba de água salgada nos 180 dias estudados em 2015 é de 12.491,43 kWh., a média mensal de consumo seria de 2.149,98 kWh com um custo mensal de **R\$ 621,98** reais (R\$ 77,16 reais no horário de pico e R\$ 544,82 reais na tarifa fora ponta).

Como nesses 180 dias apenas em 155 dias e 18 horas foi necessária operação de pelo menos um dos trocadores do sistema, a bomba de água salgada pode permanecer desligada no período ocioso gerando consumo nulo de eletricidade. O trocador EA-115 não será necessário neste tempo visto que, não haverá compressores em operação eximindo a necessidade de resfriamento dos mesmos.

Este valor em comparação com o valor pago atualmente (R\$ 25.798,78 - Tabela 20) e após as ações de eficiência propostas (R\$ 1.096,71 - Tabela 22) é 97 e 43% menores respectivamente.

Referindo-se agora aos 114 dias analisados de 2016, o consumo necessário é de **1.297,69 kWh** referente a **196.702,05 Kg/h** durante as **203 horas e 50 minutos** em que os trocadores EA-108, EA-109, EA-110, EA-112 e EA-115 estavam em operação, **630,41 kWh**

referente a **189.355,47 Kg/h** durante as **111 horas**, em que os trocadores EA-108, EA-109, EA-112 e EA-115 estavam em operação, **178,05 kWh** referente a **77.234,47 Kg/h** durante as **462 horas** em que os trocadores EA-108, EA-109 e EA-115 estavam em operação e **112,9 kWh** referente a **58.932,47 Kg/h** durante as **659 horas e 30 minutos** em que os trocadores EA-108 e EA-115 estavam em operação.

O consumo total necessário de energia elétrica pela bomba de água salgada nos 114 dias estudados em 2016 é de 2.219,05 kWh. A média mensal de consumo seria de 599,74 kWh com um custo mensal de **R\$ 173,48** reais (R\$ 21,52 reais no horário de pico e R\$ 151,96 reais na tarifa fora ponta). Dos 114 dias analisados apenas em 59 dias e 19 horas foi necessária operação de pelo menos um dos trocadores do sistema.

Em comparação com os valores praticados o dispêndio no período analisado em 2016 poderia ser 99 e 84% menor em comparação com as condições atuais e otimizadas respectivamente.

Outro ponto de efficientização energética indireta causada com a medida acima exposta será o desligamento das bombas GA-116 no período ocioso do trocador EA-115 (ver 3.1.3), as referidas bombas possuem motor com potência de 11,18kW. Se analisarmos o período parado proposto para o EA-115 nas duas condições acima expostas somente o desligamento das bombas pode gerar uma economia de **R\$ 621,11** e **R\$ 2.176,47** mensais para os dois períodos consecutivamente (analisando apenas a tarifa fora de ponta).

### **5.3.1 Medidas complementares necessárias**

O tempo de resposta para a abertura das válvulas de admissão de água salgada pode ser um limitante para a opção de bloqueio dos trocadores. A operação requer a disponibilidade imediata do trocador quando em condições severas de pressão dos tanques refrigerados, com isso para a implementação do bloqueio do equipamento quando não requerido, faz-se necessário prover meios de abertura imediata da válvula de admissão de água salgada do trocador.

Para os trocadores de *Boill-Off* esta condição é menos crítica, uma vez que, as válvulas de admissão são menores e de mais rápida abertura. No caso do sistema de *Flash* a opção seria a instalação de motor na válvula de admissão de água com acionamento via sistema supervisorio pelo operador de sala. Com isso o tempo de abertura seria reduzido significativamente permitindo a celeridade na partida que o processo requer.

Os custos com a implementação da motorização da válvula seriam mínimos, visto que já existe disponibilidade de motores sobressalentes no almoxarifado do terminal de Madre de Deus (TEMADRE), logo os custos de implementação seriam absorvidos pela própria manutenção fixa do terminal que tem o conhecimento para instalar e operacionalizar o equipamento.

Além de todas as ações já assumidas pode-se pensar ainda em implantar alarme de variação rápida de pressão no tanque, onde um acréscimo mais brusco que o esperado promova a ação de solicitar ao operador de área o alinhamento dos dois trocadores de *Boill-Off* e do EA-112. Estes custos não foram levantados.

Apesar do potencial de economia percebido com o bloqueio dos trocadores há de se salientar que a redução acentuada de rotação do motor das B-0222B e B-0225B pode provocar um aumento de temperatura dos enrolamentos do motor e danificar o equipamento conforme discutido em 2.5.

A tomada de decisão quanto à vazão mínima para a bomba que irá se refletir em redução da rotação do eixo do motor deve levar em consideração que a ventoinha de refrigeração diretamente acoplada ao eixo sofrerá um decréscimo de insuflação de ar que pode ocasionar superaquecimento do motor.

#### 5.4 TEMPO DE RETORNO PARA OS INVESTIMENTOS

Para a estimativa do tempo de retorno dos investimentos foi necessário obter os valores do inversor de frequência para a aplicação no motor. Para tal foi consultado o fornecedor WEG que é o fabricante do motor original através do setor técnico do TEMADRE o qual retornou com o orçamento do inversor conforme pode ser visualizado no ANEXO E.

Para a análise da viabilidade do investimento utilizou-se o método do valor presente líquido (VPL).

O valor presente líquido retorna valores futuros de gastos ou receitas para os valores presentes podendo-se assim fazer uma avaliação antes da desvalorização ou valorização da moeda. Os fluxos de caixa podem ser positivos ou negativos e o método VPL soma todos esses valores em taxa presente. O VPL é um dos métodos mais utilizados pela engenharia econômica para tomada de decisão sobre investimentos (URTADO et al., 2009).

O VPL pode ser calculado pela equação 20 abaixo:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 \quad (20)$$

Onde:

FC<sub>j</sub>=fluxo de caixa no período j (R\$);

j=período (meses);

i=taxa de juros utilizada (%);

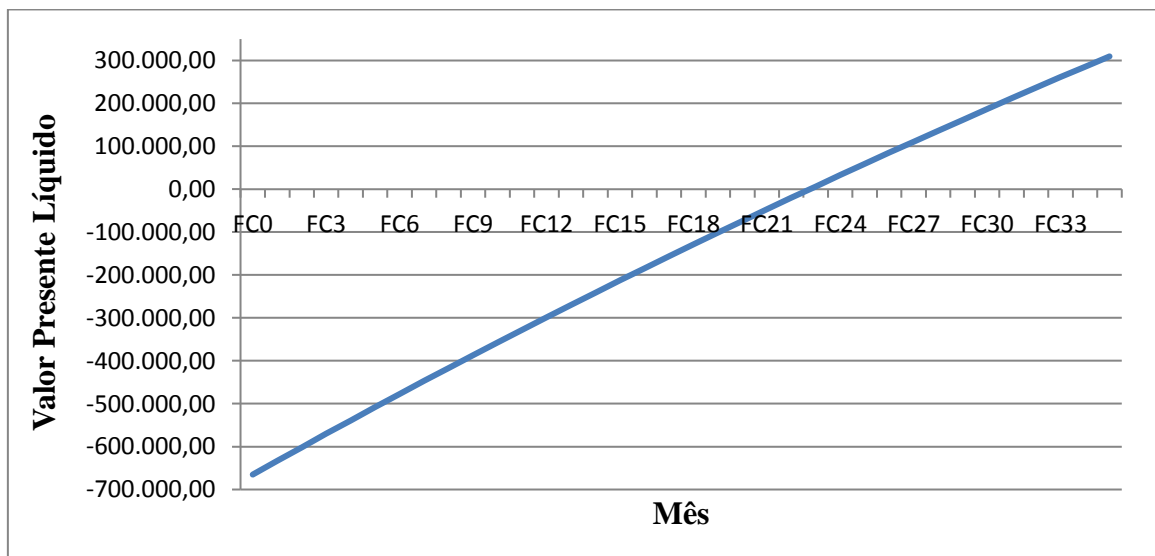
FC<sub>0</sub>=fluxo de caixa inicial (R\$).

O fluxo de caixa pode ser negativo ou positivo dependendo do balanço entre dispêndio e economia gerada. Para o cálculo foi considerado todo o custo de implementação no fluxo de caixa inicial.

Para a taxa de juros foi realizada pesquisa sobre a carteira de empréstimos do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), dentre os empréstimos aplicáveis ao caso destacamos três principais o BNDES Finame-BK Aquisição, o BNDES Automático e o BNDES PROESCO, este último diretamente voltado para ações em eficiência energética. Dentre todos os investimentos pesquisados a taxa de juros obteve variação entre 9,5 e 9,9% ao ano o que infere uma taxa de 0,83% ao mês (BNDES, 2016).

A partir da economia esperada com energia elétrica de R\$ 32.205,48 (Tabela 22), do custo de aquisição do inversor de R\$ 665.152,00 (ANEXO E) e da taxa de juros acima descrita após 24 meses o VPL é de R\$ 33.047,59, tornando-se positivo após o 23º mês como pode ser visto no gráfico da Figura 40.

Figura 40 - Gráfico de VPL por mês



Fonte: Elaborada pelo autor desta dissertação (2016).

Os custos com manutenção não foram levados em consideração tendo em vista a garantia do fabricante de 12 meses, o baixo tempo de retorno do estudo de caso e a baixa necessidade de manutenção para o equipamento no período analisado.

## 6 CONCLUSÕES

As condições experimentais avaliadas em loco para a redução da energia elétrica consumida pelo sistema trouxeram um potencial significativo de economia e redução de gastos com energia elétrica.

O processo de efficientização termodinâmica amplificou os resultados; as temperaturas de saída de gás tiveram um aumento muito grande após o estudo do processo e dos equipamentos, isso reduziu consideravelmente a vazão de água necessária em virtude da menor quantidade requerida de troca térmica do GLP. Este efeito foi mais sensível no processo de condição rotineira, uma vez que possui mais equipamentos do tipo condensador que foram os mais beneficiados com a efficientização.

A decisão de bloqueio dos trocadores quando não demandados é também muito efetiva demonstrando que o comportamento operacional pode e deve ser alterado para reduzir o consumo elétrico. Apesar da necessidade de instalação do motor para acionamento principalmente da válvula de admissão do EA-112, o potencial de economia é significativo provocando momentos em que a bomba de água salgada no Mirim pode ser completamente desligada.

O valor de aquisição da tecnologia necessária para desempenhar as ações sugeridas (ANEXO E) é baixo frente aos benefícios esperados, o tempo de retorno dos investimentos calculado pelo método do valor presente líquido tornou resultados positivos após 23 meses. Após este tempo o fluxo de caixa torna-se positivo e haverá redução do custo de energia elétrica para a planta.

O inversor de frequência proposto será o grande responsável pelo controle da vazão para os trocadores. Este deverá receber sinal de controle de um transmissor de pressão na descarga da bomba, conhecendo as equações 15 e 17 e, sabendo-se a parcela de vazão por trocador por operação (Tabela 11, Tabela 14, Tabela 16 e Tabela 18), pode-se estimar a vazão de água salgada por trocador em cada condição de operação. Para isso, o inversor deverá ser alimentado com os dados parametrizados operacionais a fim de atender e controlar efetivamente não só a vazão da bomba, mas a vazão para cada trocador de calor.

Caso as ações de eficiência já tivessem sido tomadas no ano de 2015 haveria uma grande economia financeira para o sistema em 2016. No período de análise da dissertação (18/05/2016 à 09/09/2016) o potencial de economia apenas com o desligamento das bombas GA-116 para o trocador EA-115 seria de R\$ 2.176,47 por mês. O custo energético das

operações necessárias no período foi de R\$ 173,48 reais com isso o potencial de economia mensal seria de R\$ 34.381,95 reais.

Apesar de não ser levado em consideração para o cálculo da viabilidade econômica de implementação, o período supracitado traz a reflexão da efetividade e potencial econômico da ação. Períodos de baixa movimentação são possíveis e comuns, e a despeito da crise econômica nacional já discutida no capítulo 1, um baixo fluxo de operações pode ocorrer a qualquer momento em virtude de variações de mercado ou de nível dos tanques de GLP refrigerado.

A real necessidade de gasto energético para o período de fluxo normal do SEGAS é de apenas 22% do que atualmente é gasto atualmente. Isso significa que 78% da energia gasta no bombeamento de água salgada para o SEGAS poderia ser evitada gerando uma economia financeira relevante de R\$ 32.205,48.

Em síntese a implantação do inversor de frequência é adequada, o potencial de economia apresentado e o baixo tempo de retorno para o investimento leva a esta conclusão. Vinte e três meses para o retorno completo de um investimento que tem potencial atual de economia de mais de trinta mil reais por mês é atrativo e deve ser avaliado.

O grande ganho da sistemática proposta é olhar para o processo como um todo e não somente para o equipamento. Ações de eficiência são por muitas vezes avaliadas isoladamente e com foco na tecnologia aplicada as máquinas para gerar redução de consumo, no entanto, quando comportamentos e procedimentos operacionais são analisados têm-se uma soma de efeitos que pode amplificar consideravelmente a eficiência.

A mudança nos parâmetros de processo foi fundamental para a obtenção do significativo potencial de economia da presente dissertação. A visão e as ações tomadas dentro do processo permitiram a alteração das temperaturas de saída dos trocadores baseados na sua real funcionalidade e posicionamento dentro da planta. Esta mudança foi o ponto chave para a magnitude dos resultados.

Ampliando as ações para a mudança de procedimentos e comportamentos operacionais pode-se obter ainda mais redução de consumo. Com o bloqueio dos trocadores sem necessidade operacional o custo foi reduzido de R\$ 8.825,16 para impressionantes R\$ 173,48 reais mensais como pode ser revisto em 5.3.

Esta redução é uma evidência clara de que quando a análise é amplificada para dentro do processo o potencial de eficientização é ainda mais elevado. Neste tocante analisando-se o caso de maneira ainda mais ampla podem surgir, economias não esperadas e fora do ponto

focal de análise. No caso da presente dissertação o simples bloqueio dos trocadores quando não em utilização além de reduzir o consumo das bombas de água salgada para os valores expostos no parágrafo anterior, permitiriam o desligamento das bombas GA-116 o que geraria economia indireta de R\$ 2.176,47 mensais em 2016.

Num momento em que o setor de petróleo vem se reestruturando, pensar em ser mais eficiente e em reduzir os impactos ao meio ambiente é de vital importância para a competitividade e, por conseguinte, sobrevivência de uma indústria que deve entrar em declínio nas próximas décadas forçada por questões ambientais que estão promovendo o avanço cada vez mais latente de fontes energéticas renováveis em detrimento ao petróleo e seus derivados.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, R.O. Circuitos Trifásicos. In: \_\_\_\_\_. **Análise de circuitos em corrente alternada**. São Paulo: Érica, 1989. Cap. 5, p. 104-115.
- ANEEL a– Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 649 de 27 de Fevereiro de 2015**. Aprova o Submódulo 6.8 dos Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET, que trata das Bandeiras Tarifárias e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/006/resultado/ren2015649.pdf>> Acesso em: 5 nov. 2015, 02:56:00.
- ANEEL b– Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Homologatória Nº 1858 de 27 de Fevereiro de 2015**. Homologa os resultados da revisão tarifária extraordinária das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica, fixa as Tarifas de Energia –TEs e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição – TUSDs. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/007/resultado/reh20151858.pdf>> Acesso em: 13 out. 2015, 05:30:00.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP Nº18 de 02/09/2004**. Estabelece as especificações dos Gases Liquefeitos de Petróleo - GLP, de origem nacional ou importada, comercializados pelos diversos agentes econômicos no território nacional, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 2/2004. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>> Acesso em: 18 ago. 2016, 12:15:00.
- APPENZELLER, T. O ciclo da Vida: Ciclo do Carbono. **National Geographic Brasil: Edição Especial CO2**, a. 12, n. 139, p.42-47. 2011.
- ARAÚJO, J. A. B. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica em sistemas de irrigação por aspersão**. 2003. 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2003.
- AWAD, M. M. Fouling of Heat Transfer Surfaces. In: \_\_\_\_\_ **Heat transfer - theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems**. Prof. Aziz Belmiloudi (Ed.). Rijeka: InTech, 2011. Cap. 20, p. 505-542. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/heat-transfer-theoretical-analysis-experimental-investigations-and-industrial-systems/fouling-of-heat-transfer-surfaces>> Acesso em: 21 mar. 2016, 10:27:00.
- BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento. **Avaliação de sistemas de bombeamento de água**: manual de eficiência energética. Iniciativa de Água e Saneamento, Iniciativa de Energia Sustentável e Mudança Climática 1. ed. Washington, 2011. 87p.
- BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **Navegador de financiamentos**. Disponível em: < <http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/navegador/#/>> Acesso em: 15 out. 2016, 19:43:25.
- BOLDEA, I. Control issues in adjustable-speed drives: a key component for realizing energy savings in today's technology. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v.2, n.3, p.32-50. 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional – BEN**. Brasília, 2016a.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Caracterização do Cenário Macroeconômico para os próximos 10 anos (2016-2025)**. Rio de Janeiro: EPE, 2016b.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional – BEN**. Brasília: MME, 2014a.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional – BEN**: Brasília: MME, 2014b. Capítulo 5 (Balanco dos Centros de Transformação). (Série histórica 1970-2014)

\_\_\_\_\_. **Introdução a engenharia química**. 3. ed. [S.l.]: Interciência. 2013. 369p.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Comunicados do IPEA: a década inclusiva (2001-2011): desigualdade, pobreza e políticas de renda**. [S.l.]: IPEA, 2012. n. 155.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME : EPE, 2007.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanco de Energia Útil**. Brasília: MME, 2005.

BROWN, D.; CABBAGE, M.; MCCARTHY, L. NASA, NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015. **NASA – Climate**, jan/2016. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015>> Acesso em: 23 out. 2016, 17:19:00.

CAMPANA, S. et al. A. Estudo comparativo de métodos para estimativa do carregamento e rendimento de motores elétricos para auditoria energética. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 241-246, 2000.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (Brasil). **Resultado Consolidado dos leilões – 04/2015**. 2015. Disponível em:

<[http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso\\_rapido\\_header\\_publico\\_nao\\_logado/biblioteca\\_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o&\\_afLoop=403668608658400#%40%3F\\_afLoop%3D403668608658400%26tipo%3DResultado%2BConsolidado%26assunto%3DLeil%25C3%25A3o%26\\_adf.ctrl-state%3Db03u711j5\\_371](http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o&_afLoop=403668608658400#%40%3F_afLoop%3D403668608658400%26tipo%3DResultado%2BConsolidado%26assunto%3DLeil%25C3%25A3o%26_adf.ctrl-state%3Db03u711j5_371)> Acesso em: 14 maio 2015, 15:43:10.

CHATT, Bijoy. Power Quality Issues with variable speed drive: A case Study for oil exploration Operation in Russia. **IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS: REGION 5 CONFERENCE**, Texas, 2006. **Proc...** 2006. p.280-286,

CIRANO, M.; LESSA, G. C. Oceanographic Characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 25, n. 4, p. 363-387, 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102261X2007000400002&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102261X2007000400002&script=sci_abstract&tlng=pt)> Acesso em: 29 ago. 2015, 12:54:00

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Cartilha Eficiência Energética na Indústria**: Entre nessa corrente. 2015. Disponível em:

<[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/cartilha\\_cni\\_corrente\\_FINAL-small1.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/cartilha_cni_corrente_FINAL-small1.pdf)> Acesso em: 29 jul. 2015, 14:25:00.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005.

**Resolução N° 430 de 13 de Maio de 2011.** Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol\\_lanceflue\\_30e31mar11.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf)>

Acesso em: 25 set. 2016, 11:25:00.

DUTRA, T. **Investigação experimental da transferência de calor em componentes de compressores alternativos de refrigeração doméstica.** 2008. 234p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

EL-MORSI, M. Energy and exergy analysis of LPG (liquefied petroleum gas) as a drop in replacement for R134a in domestic refrigerators. **Energy**, n. 86, p. 344-353, 2015.

EMBRASUL. **Manual de instalação e operação analisador de energia RE6000.** Rev. Porto Alegre, 2002.

FERNANDES, M. V. A. **Apostila de medidas elétricas.** Natal: Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

FERREIRA, D. P. **Eficiência da indústria brasileira: uma abordagem de fronteira estocástica de produção em dados de painel com heterogeneidade.** 2010. 91p. Dissertação (Mestrado em Economia) Departamento de Economia - Universidade de Brasília - UNB, Brasília, 2010.

FIORUCCI, E. et al. Variable Speed drive characterization: review of measurement techniques and future trends. **Advances in Power Electronics**, v.13, 14p, 2013.

FUPAI/EFFICIENTIA. Ministério de Minas e Energia. Centrais Elétricas Brasileiras. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 272p.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria.** 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

GODOI, J. M. A. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade.** 2011, 126p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós Graduação em Energia - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2011.

GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética.** 2008. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

HASEGAWA, M. M. **Modelo matemático para redimensionamento de motores elétricos trifásicos superdimensionados**. 2003, 135 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade Estadual Paulista – UNESP, Botucatu, 2003.

IMF – International Monetary Fund. **World economy outlook: update july 2016**. 2016. Disponível em: < <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/update/02/>> Acesso em: 16 out. 2016, 19:03:45.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Trocadores de Calor. In: \_\_\_\_\_. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Cap. 11, p. 452-493.

KRIEL, C.; JOUBERT, R.; MARAIS, J. The influence of variable speed drives on electric motor operating temperatures. In: INDUSTRIAL AND COMMERCIAL USE OF ENERGY CONFERENCE (ICUE), 10., 2013. **Proceedings...** 2013. p. 1-6.

LASKOWSKI, R. Relations for steam power plant condenser performance in off-design conditions in the function of inlet parameters and those relevant inreference conditions. **Applied Thermal Engineering**, n.103, p.528–536, 2016.

LIMA, S. Usinas Térmicas Atingem Pico Histórico de Geração de Energia. **Folha de São Paulo**. Rio de Janeiro, fev. 2014. Caderno Mercado. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/02/1410939-usinas-termicas-atingem-pico-historico-de-geracao-de-energia.shtml>> Acesso em: 14 mai. 2015, 12:55:03.

LINO, L. Curiosidades sobre motores trifásicos. **Digel Elétrica Ltda**. Disponível em: <[http://www.digel.com.br/novosite/index.php?option=com\\_content&view=article&id=72:motores&catid=42:tecnicos&Itemid=69](http://www.digel.com.br/novosite/index.php?option=com_content&view=article&id=72:motores&catid=42:tecnicos&Itemid=69)> Acesso em: 15 jun. 2015, 12:34:00.

LOESER, S. **Metodologia de projeto estrutural de bombas centrífugas verticais de poço úmido**. 2011. 136p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear Reatores) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MAHESWARAN, D.et al. Energy Efficiency in Electrical Systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, DRIVES AND ENERGY SYSTEMS, Bengaluru, 2012. **Proc...** 2012.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; ERTUGRUL, N. Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. **Drinking water: engineering and science**, Adelaide-Austrália, n.5, p. 15-21. 2012.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 474 p.

MAXWELL, J. B. Thermal Properties In: DATA Book on Hydrocarbons. 9.ed. Princeton: Robert E. Krieger Publishing Company, INC. 1968. p. 75-136.

MILLERO, F. J. Composition of the Major Componentes of Seawater. In: \_\_\_\_\_. **Chemical oceanography**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 55-91.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. Induction Motor Drives. In: \_\_\_\_\_. **Power electronics: converters, applications and design**. 3. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2003. p. 399-434.

MOREIRA, S. G. **Estratégia de simulação para análise da eficiência energética em sistemas de bombeamento monitorado via supervisorio**. 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS, Campo Grande, 2008.

MURAVLEVA, O.; MURAVLEV, O. Induction motor Improvement for Energy saving technologies. In: KOREA-RUSSIA SYMPOSIUM SCIENCE AND TECHNOLOGY KORUS, 7., 2003. **Procd...** 2003.

OENNING, R. **Análise da viabilidade econômica de um projeto de implantação de variadores de velocidade em bombas centrífugas industriais**. 2011. 69p. Monografia (Especialização em Engenharia Econômica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

OLIVEIRA, G. O.; CARNEIRO, M. G.; ANJOS, J. A. S. A. Impactos da crise hídrica na emissão de CO2 para geração de energia elétrica no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, Gramado, 2016. **Anais...** 2016.

ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Série Histórica Energia armazenada SE/CO; 2011-2016**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/historico/energia\\_armazenada\\_out.aspx](http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada_out.aspx)> Acesso em: 16 out. 2016, 18:10:00.

ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Série Histórica Energia armazenada SE/CO; 2001-2002**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/historico/energia\\_armazenada\\_out.aspx](http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada_out.aspx)> Acesso em: 01 jul. 2015, 12:15:00.

PAIXÃO, J. P. **Controle de velocidade de motores elétricos**. 2009. 62 p. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Automação Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PROCEL - Programa Nacional De Conservação Da Energia Elétrica. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. Itajubá, MG: UNIFEI, 2006.

NORBERTO, A. J. Motores trifásicos de indução: dimensionamento. **Integração**, v.11, n. 42, p. 243-250, jul./ago./set. 2005.

SONNTAG, R. E; BORGNACKKE, C; WYLEN, G. J. V. Apêndice B: Tabelas Termodinâmicas, In: \_\_\_\_\_. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. p. 535-558.

SOUZA, L. F. **Análise termica de um dessalinizador de múltiplo efeito para obtenção de água potável**. 2002. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

STOFFEL, B. **Assesing the energy efficiency of pumps and pump units**. [S.l.]: Elsevier/Europump, 2015.

UNFCCC - United Nations Framework Convention On Climate Change. Adoption of the Paris agreement. In: CONFERENCE OF THE PARTIES, 21., Paris, 2015. **Proc....** 2015. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>> Acesso em: 23 jan. 2016. 17:31:05.

URTADO, E. S. et al. Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: Um estudo de caso. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS GRADUAÇÃO, 9., 2009. **Anais...** 2009.

WAIDE, P; BRUNNER, C. U. **Energy-efficiency policy opportunities for electric motor driven systems**. Paris: International Energy Agency (IEA), 2011.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Guia técnico: motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul, 2010.

WEN, J. et al. Experimental investigation on performance comparison for shell-and-tube heat exchangers with different baffles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 84, p.8, 2015.

YIN, L. et al. Research on the energy consumption evaluation and energy saving technical reconstruction of centrifugal pump system based on actual demand. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 5, 2013.

## ANEXO A



**Re: Dissertação de Mestrado Sistema de Refrigeração SEGAS** 

**Waldo Gomes dos Santos**

**TRANSPETRO/DDT/TA/MDEUS**

09/06/2015 11:29

Para: Roberto Carlos Sacramento da Costa

Cc: Manasses Guimaraes Carneiro, Aline Claudia Franca

Teixeira, Alberto Carlos Fonseca de Carvalho

Esta mensagem está assinada digitalmente.



Ok Manassés,

Não existe objeção à realização do estudo.

Bom trabalho.

Sds,

Waldo Gomes dos Santos  
Gerente Geral do Terminal Aquaviário de Madre de Deus  
PETROBRAS TRANSPORTE S/A  
waldo.gomes@petrobras.com.br  
Chave NTF2 Rota 827-3717 (71) 3642-3717

Roberto Carlos Sacramento da Costa **Ok, Manasses estamos a dis...** 09/06/2015 10:10:13

De: Roberto Carlos Sacramento da Costa/BRA/Petrobras  
Para: Manasses Guimaraes Carneiro/BRA/Petrobras@Petrobras,  
Cc: Waldo Gomes dos Santos/BRA/Petrobras@Petrobras, Aline Claudia Franca  
Teixeira/BRA/Petrobras@Petrobras, Alberto Carlos Fonseca de  
Carvalho/BRA/Petrobras@Petrobras  
Data: 09/06/2015 10:10  
Assunto: Re: Dissertação de Mestrado Sistema de Refrigeração SEGAS

Ok, Manasses estamos a disposição para ajudar no que você precisar.

Atenciosamente.

Roberto C S da Costa  
Coordenador da Planta de Refrigeração de GLP - TA Madre de Deus/ OP / OPGLP  
Chave Pessoal: TMEX Chave Estrutural: PROZ  
E-mail: rccosta@petrobras.com.br  
Rota: 827-3714 Fax : 71 3642-3243  
Fones : 71 3642-3714 / 71 9978-3648

Manasses Guimaraes Carneiro **Caro Waldo; Conforme já havíamos...** 09/06/2015 09:57:30

De: Manasses Guimaraes Carneiro/BRA/Petrobras  
Para: Waldo Gomes dos Santos/BRA/Petrobras@Petrobras, Aline Claudia Franca  
Teixeira/BRA/Petrobras@Petrobras, Roberto Carlos Sacramento da  
Costa/BRA/Petrobras@Petrobras,  
Cc: Alberto Carlos Fonseca de Carvalho/BRA/Petrobras@Petrobras  
Data: 09/06/2015 09:57

Assunto: Dissertação de Mestrado Sistema de Refrigeração SEGAS

---

Caro Waldo;

Conforme já havíamos conversado solicito autorização para estudar o sistema de bombas de água salgada do SEGAS B-0222B, B-0225B, B-0225C.

Com este estudo pretendo simular os efeitos da instalação de um inversor de frequência de modo a controlar a rotação das bombas a depender da demanda de água salgada no SEGAS visando a economia de energia deste subsistema.

Isto implicará também em publicação na dissertação de assuntos não estratégicos, tais como potência dos motores, alinhamentos disponíveis, particularidades da bomba, etc...

Roberto e Aline, gostaria de algumas visitas a planta também, apesar de já tê-la operado estou afastado à algum tempo e preciso relembrar algumas rotinas de alinhamentos do sistema.

Desde já agradeço a todos.

Att.

Manasses Guimarães Carneiro  
TRANSPETRO/DTO/TA/MDEUS/OP/OPGNL

Técnico de Operações Pleno


Chave: V78F

E-mail: manasses.carneiro@petrobras.com.br

Fone: (71) 3877-9818 / (71) 9691-1708 Rota: 726-9818



## ANEXO B

|  |  |  |
|--|--|--|
|  <b>PETROBRAS TRANSPORTES S.A.</b><br><b>TRANSPETRO</b>   | <b>SOLICITAÇÃO DE NOTA PM</b><br><b>Nota de Ocorrência</b> | <b>M4 Cópia 2</b><br><b>80196858</b>       |
| <b>CENTRO DE PLANEJAMENTO</b><br><b>T064</b><br><b>Terminal Madre de Deus</b>  | <b>AUTOR: MANASSES</b>                                     | <b>Pág. 1 de 1</b>                         |
| <p><b>ORDEM:</b></p> <p><b>Grupo Planejamento:</b> MAN Manutenção M Deus      <b>Área Operacional:</b> SAI Sist. Água Ind<br/> <b>Centro de Trabalho:</b> T064<br/> <b>Prioridade:</b> D - Planejada - RI<br/> <b>Início Previsto:</b> 15.04.2017      <b>Término Previsto:</b> 10.04.2018<br/> <b>Descrição:</b> SEGAS-Efetuar medição de energia<br/> <b>LOCAL DE INSTALAÇÃO:</b> MAD.SAI.SEGAS .AGUA SALGADA .MB-0225-B<br/> BOMBAS SIST. AGUA IND. MB-0225-B<br/> <b>Tipo de Objeto:</b>      <b>Classe:</b><br/> <b>EQUIPAMENTO:</b> 10053606 MOTOR DA BOMBA REFRIG. SEGÁS M-0225-B<br/> <b>Campo de Seleção:</b> MIRIM-MB-0225-B<br/> <b>Tipo de Objeto:</b>      <b>Classe:</b> 002 MOTOR_ELETRICO<br/> <b>Fabricante:</b> Weg<br/> <b>Denominação Tipo:</b><br/> <b>Nº de série:</b></p> |  |  |
| <p style="text-align: center;"><b>SITUAÇÃO</b><br/>(Descrição)</p> <p>20.04.2016 09:07:45 Manasses Guimaraes Carneiro (V78F) Efetuar medição de qualidade e consumo de energia elétrica no painel da bomba de água salgada do SEGAS tendo em vista dissertação de mestrado sobre eficiência Energética. Procedimento de estudo negociado com Aline.</p>  |  |  |
| <p style="text-align: center;"><b>CATÁLOGOS</b></p>  |  |  |
| <b>ITEM:</b> 0 <b>TEXTO:</b><br><br><b>DESCRIÇÃO CÓDIGO DESCRIÇÃO</b><br>Objeto:<br>Sintoma:<br>Causa:<br>Medida:<br>Ação:   |  | <b>SIM/NÃO</b><br>( )<br>( )<br>( )<br>( ) |
| <p style="text-align: center;"><b>OBSERVAÇÕES</b></p>  |  |  |
| <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>  |  |  |
| <p style="text-align: center;"><b>OBSERVAÇÕES DO EXECUTANTE</b></p>  |  |  |
| <b>Início Avaria / Parada:</b>   |  | <b>Tempo de Parada:</b>                    |
| <b>Fim Avaria / Parada:</b>  |  | <b>Executado por:</b>                      |

## ANEXO C

## BOLETIM DE ENSAIO

|            |                        |             |                |                 |                     |
|------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Local      | TQ - 2204670B 2204670B | Amostra     | 7541789        | Nº. Certificado | 2431-16             |
| Tipo       | AMOSTRA DE FUNDO       | Finalidade  | VENDA NACIONAL | Recebimento     | 02/07/2016 06:00:00 |
| Executante | 220 - RLAM             | Solicitante | 220 - RLAM     | Amostragem      | 02/07/2016 05:20:00 |

Produto: 610 - GLP (PROPANO/BUTANO).  
Produto especificado

| AGUA LIVRE            |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|----------|
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| VIS-003               | AGUA LIVRE                           | AUSE  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| CORROSÃO              |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-1838                | CORROSIVIDADE AO COBRE 1H 37,8 GC    | 1     | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| CROMATOGRAFIA GASOSA  |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2598                | PRESSAO DE VAPOR A 37,8 GC           | 618   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | kPa      |
| D-2598                | MASSA ESPECIFICA A 20 GC             | 563,8 | (E)   | (E)       | (I)   | (E)        | kg/m3    |
| D-2163                | 1,3-BUTADIENO                        | 0,57  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | N-BUTANO                             | 12,61 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ISO-BUTANO                           | 18,24 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | CIS-BUTENO-2                         | 7,07  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | TRANS-BUTENO-2                       | 9,88  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ISO-BUTENO                           | 10,30 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | BUTENO-1                             | 8,36  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PROPANO                              | 11,34 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PROPENO                              | 20,58 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | METANO                               | <0,01 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ETANO                                | 0,10  | (I)   | (E)       | (E)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | BUTANOS                              | 66,27 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PENTANOS E MAIS PESADOS              | 0,44  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | % volume |
| ENXOFRE GLP           |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2784                | ENXOFRE TOTAL                        | 67    | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mg/kg    |
| H2S GASES LIQUEFEITOS |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2420                | GAS SULFIDRICO(H2S)                  | PASS  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| PONTO EBUL.95% EVAP.  |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-1837                | PONTO DE EBULICAO DOS 95% EVAPORADOS | 0,0   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | grau C   |
| RESIDUO DE GLP        |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2158                | RESIDUO DE 100 ML EVAPORADOS         | 0,00  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mL       |

## BOLETIM DE ENSAIO

|            |                        |             |                |                 |                     |
|------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Local      | TQ - 2204670B 2204670B | Amostra     | 7505349        | Nº. Certificado | 2228-16             |
| Tipo       | AMOSTRA DE FUNDO       | Finalidade  | VENDA NACIONAL | Recebimento     | 17/06/2016 02:00:00 |
| Executante | 220 - RLAM             | Solicitante | 220 - RLAM     | Amostragem      | 17/06/2016 00:30:00 |

Produto: 610 - GLP(PROPANO/BUTANO).

| AGUA LIVRE |            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|------------|------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método     | Ensaio     |       |       |           |       |            |         |
| VIS-003    | AGUA LIVRE | AUSE  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CORROSÃO |                                   | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------|-----------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método   | Ensaio                            |       |       |           |       |            |         |
| D-1838   | CORROSIVIDADE AO COBRE 1H 37,8 GC | 1     | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CROMATOGRAFIA GASOSA |                            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
|----------------------|----------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|----------|
| Método               | Ensaio                     |       |       |           |       |            |          |
| D-2598               | PRESSAO DE VAPOR A 37,8 GC | 555   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | kPa      |
| D-2598               | MASSA ESPECIFICA A 20 GC   | 564,1 | (E)   | (E)       | (I)   | (E)        | kg/m3    |
| D-2163               | 1,3-BUTADIENO              | 0,97  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | N-BUTANO                   | 14,24 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTANO                 | 19,76 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | CIS-BUTENO-2               | 6,57  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | TRANS-BUTENO-2             | 9,72  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTENO                 | 13,11 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTENO-1                   | 9,68  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPANO                    | 24,83 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPENO                    | 0,37  | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | METANO                     | <0,01 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ETANO                      | 0,71  | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTANOS                    | 73,09 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PENTANOS E MAIS PESADOS    | 0,02  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | % volume |

| ENXOFRE GLP |               | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-------------|---------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método      | Ensaio        |       |       |           |       |            |         |
| D-2784      | ENXOFRE TOTAL | 56    | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mg/kg   |

| H2S GASES LIQUEFEITOS |                     | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método                | Ensaio              |       |       |           |       |            |         |
| D-2420                | GAS SULFIDRICO(H2S) | PASS  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| PONTO EBUL.95% EVAP. |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método               | Ensaio                               |       |       |           |       |            |         |
| D-1837               | PONTO DE EBULICAO DOS 95% EVAPORADOS | -1,1  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | grau C  |

| RESIDUO DE GLP |                              | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método         | Ensaio                       |       |       |           |       |            |         |
| D-2158         | RESIDUO DE 100 ML EVAPORADOS | 0,00  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mL      |

## BOLETIM DE ENSAIO

|            |                        |             |                |                 |                     |
|------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Local      | TQ - 2204670C 2204670C | Amostra     | 7518197        | Nº. Certificado | 2316-16             |
| Tipo       | AMOSTRA DE FUNDO       | Finalidade  | VENDA NACIONAL | Recebimento     | 22/06/2016 11:31:38 |
| Executante | 220 - RLAM             | Solicitante | 220 - RLAM     | Amostragem      | 22/06/2016 09:30:00 |

Produto: 610 - GLP(PROPANO/BUTANO).  
Produto especificado

| AGUA LIVRE |            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|------------|------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método     | Ensaio     |       |       |           |       |            |         |
| VIS-003    | AGUA LIVRE | AUSE  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CORROSÃO |                                   | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------|-----------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método   | Ensaio                            |       |       |           |       |            |         |
| D-1838   | CORROSIVIDADE AO COBRE 1H 37,8 GC | 1     | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CROMATOGRAFIA GASOSA |                            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
|----------------------|----------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|----------|
| Método               | Ensaio                     |       |       |           |       |            |          |
| D-2598               | PRESSAO DE VAPOR A 37,8 GC | 564   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | kPa      |
| D-2598               | MASSA ESPECIFICA A 20 GC   | 563,7 | (E)   | (E)       | (I)   | (E)        | kg/m3    |
| D-2163               | 1,3-BUTADIENO              | 1,04  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | N-BUTANO                   | 12,62 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTANO                 | 18,94 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | CIS-BUTENO-2               | 4,76  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | TRANS-BUTENO-2             | 8,00  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTENO                 | 15,55 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTENO-1                   | 12,16 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPANO                    | 24,97 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPENO                    | 1,33  | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | METANO                     | <0,01 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ETANO                      | 0,58  | (I)   | (E)       | (E)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTANOS                    | 73,06 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PENTANOS E MAIS PESADOS    | 0,06  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | % volume |

| ENXOFRE GLP |               | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-------------|---------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método      | Ensaio        |       |       |           |       |            |         |
| D-2784      | ENXOFRE TOTAL | 63    | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mg/kg   |

| H2S GASES LIQUEFEITOS |                     | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método                | Ensaio              |       |       |           |       |            |         |
| D-2420                | GAS SULFIDRICO(H2S) | PASS  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| PONTO EBUL.95% EVAP. |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método               | Ensaio                               |       |       |           |       |            |         |
| D-1837               | PONTO DE EBULICAO DOS 95% EVAPORADOS | -1,7  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | grau C  |

| RESIDUO DE GLP |                              | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método         | Ensaio                       |       |       |           |       |            |         |
| D-2158         | RESIDUO DE 100 ML EVAPORADOS | 0,00  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mL      |

## BOLETIM DE ENSAIO

|            |                        |             |                |                 |                     |
|------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Local      | TQ - 2204670F 2204670F | Amostra     | 7512907        | Nº. Certificado | 2283-16             |
| Tipo       | AMOSTRA DE FUNDO       | Finalidade  | VENDA NACIONAL | Recebimento     | 20/06/2016 11:41:00 |
| Executante | 220 - RLAM             | Solicitante | 220 - RLAM     | Amostragem      | 20/06/2016 06:30:00 |

Produto: 610 - GLP(PROPANO/BUTANO).  
Produto especificado

| AGUA LIVRE            |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|----------|
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| VIS-003               | AGUA LIVRE                           | AUSE  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| CORROSÃO              |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-1838                | CORROSIVIDADE AO COBRE 1H 37,8 GC    | 1     | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| CROMATOGRAFIA GASOSA  |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2598                | PRESSAO DE VAPOR A 37,8 GC           | 542   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | kPa      |
| D-2598                | MASSA ESPECIFICA A 20 GC             | 567,6 | (E)   | (E)       | (I)   | (E)        | kg/m3    |
| D-2163                | 1,3-BUTADIENO                        | 1,11  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | N-BUTANO                             | 10,26 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ISO-BUTANO                           | 18,14 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | CIS-BUTENO-2                         | 5,60  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | TRANS-BUTENO-2                       | 9,30  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ISO-BUTENO                           | 17,20 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | BUTENO-1                             | 13,53 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PROPANO                              | 19,57 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PROPENO                              | 4,95  | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | METANO                               | <0,01 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | ETANO                                | 0,28  | (I)   | (E)       | (E)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | BUTANOS                              | 75,14 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163                | PENTANOS E MAIS PESADOS              | 0,05  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | % volume |
| ENXOFRE GLP           |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2784                | ENXOFRE TOTAL                        | 71    | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mg/kg    |
| H2S GASES LIQUEFEITOS |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2420                | GAS SULFIDRICO(H2S)                  | PASS  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |          |
| PONTO EBUL.95% EVAP.  |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-1837                | PONTO DE EBULICAO DOS 95% EVAPORADOS | -1,1  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | grau C   |
| RESIDUO DE GLP        |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
| Método                | Ensaio                               |       |       |           |       |            |          |
| D-2158                | RESIDUO DE 100 ML EVAPORADOS         | 0,05  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mL       |

## BOLETIM DE ENSAIO

|            |                        |             |                |                 |                     |
|------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Local      | TQ - 2204670F 2204670F | Amostra     | 7520891        | Nº. Certificado | 2332-16             |
| Tipo       | AMOSTRA DE FUNDO       | Finalidade  | VENDA NACIONAL | Recebimento     | 23/06/2016 13:08:25 |
| Executante | 220 - RLAM             | Solicitante | 220 - RLAM     | Amostragem      | 23/06/2016 10:30:00 |

Produto: 610 - GLP(PROPANO/BUTANO).  
Produto especificado

| AGUA LIVRE |            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|------------|------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método     | Ensaio     |       |       |           |       |            |         |
| VIS-003    | AGUA LIVRE | AUSE  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CORROSÃO |                                   | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------|-----------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método   | Ensaio                            |       |       |           |       |            |         |
| D-1838   | CORROSIVIDADE AO COBRE 1H 37,8 GC | 1     | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| CROMATOGRAFIA GASOSA |                            | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade  |
|----------------------|----------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|----------|
| Método               | Ensaio                     |       |       |           |       |            |          |
| D-2598               | PRESSÃO DE VAPOR A 37,8 GC | 585   | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | kPa      |
| D-2598               | MASSA ESPECIFICA A 20 GC   | 562,2 | (E)   | (E)       | (I)   | (E)        | kg/m3    |
| D-2163               | 1,3-BUTADIENO              | 0,98  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | N-BUTANO                   | 11,91 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTANO                 | 17,62 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | CIS-BUTENO-2               | 4,99  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | TRANS-BUTENO-2             | 7,82  | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ISO-BUTENO                 | 15,02 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTENO-1                   | 12,41 | (I)   | (I)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPANO                    | 26,91 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PROPENO                    | 1,74  | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | METANO                     | <0,01 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | ETANO                      | 0,58  | (I)   | (E)       | (E)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | BUTANOS                    | 70,74 | (I)   | (E)       | (I)   | (I)        | % volume |
| D-2163               | PENTANOS E MAIS PESADOS    | 0,02  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | % volume |


| ENXOFRE GLP |               | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-------------|---------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método      | Ensaio        |       |       |           |       |            |         |
| D-2784      | ENXOFRE TOTAL | 66    | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mg/kg   |

| H2S GASES LIQUEFEITOS |                     | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método                | Ensaio              |       |       |           |       |            |         |
| D-2420                | GAS SULFIDRICO(H2S) | PASS  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        |         |

| PONTO EBUL.95% EVAP. |                                      | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método               | Ensaio                               |       |       |           |       |            |         |
| D-1837               | PONTO DE EBULICAO DOS 95% EVAPORADOS | -1,7  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | grau C  |

| RESIDUO DE GLP |                              | Valor | Geral | Petrobras | Local | Transpetro | Unidade |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-----------|-------|------------|---------|
| Método         | Ensaio                       |       |       |           |       |            |         |
| D-2158         | RESIDUO DE 100 ML EVAPORADOS | 0,00  | (E)   | (I)       | (I)   | (E)        | mL      |

## ANEXO D

|   |                   |  |                   |   |  |
|---|-------------------|--|-------------------|---|--|
| <b>COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA</b><br>AV. EDGARD SANTOS, 300,<br>CABULA VI, SALVADOR, BAHIA<br>CEP 41181-900<br>CNPJ 15.139.629/0001-94<br>INSCRIÇÃO ESTADUAL 00478696NO   |                   | <br><b>coelba</b><br>Grupo Neoenergia<br>www.coelba.com.br  |                   | <b>COELBA 0800 071 0800</b><br>ATENDIMENTO AO DEFICIENTE AUDITIVO OU DE FALA: 0800 281 0142<br>OUVIDORIA: 0800 071 7676 / SMS FALTA DE ENERGIA: 27308<br>AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL<br>167-LIGAÇÃO GRATUITA DE TELEFONES FIXOS E MOVEIS |  |
| <b>NOTA FISCAL   FATURA   CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA</b>   |                   |  |                   |   |  |
| <b>DADOS DO CLIENTE</b><br>PETROBRAS TRANSPORTES S A TRANSPETRO<br><br>CNPJ: 02.709.449/0008-25<br><br><b>ENDEREÇO</b><br>TV TERM MARITIMO ALM ALVES CAMARA 1 AP-0000<br><br>CENTRO-MADRE DE DEUS/MADRE DE DEUS<br>42600-000 MADRE DE DEUS BA<br>CENTRO DE LEITURA:0700<br>TELEFONES:7136423288 71988347234 |                   | <b>DATA DE VENCIMENTO</b><br><b>27/05/2016</b><br><br><b>TOTAL A PAGAR (R\$)</b><br><b>238.439,29</b>  |                   | <b>DATA DA EMISSÃO DA NOTA FISCAL</b><br><b>15/04/2016</b><br><br><b>DATA DA APRESENTAÇÃO</b><br><b>19/04/2016</b><br><br><b>NUMERO DA NOTA FISCAL</b><br><b>147205419</b>  |  |
|   |                   | <b>CONTA CONTRATO</b><br><b>0070002353</b><br><br><b>Nº DO CLIENTE</b><br><b>1002677213</b><br><br><b>Nº DA INSTALAÇÃO</b><br><b>3171844</b> |                   | <b>CLASSIFICAÇÃO</b><br>A3 Parcialmente Livre<br><b>COMERCIAL - SERVICOS DE TRANSPORTES EXCETO TRACÇÃO ELÉTRICA</b>   |  |
|   |                   | <b>RESERVADO AO FISCO</b><br>0E22.FFF0.3354.45FB.1236.5134.CB30.19B8   |                   |   |  |
| <b>DESCRIÇÃO DA NOTA FISCAL E INFORMAÇÕES IMPORTANTES</b>   |                   |  |                   |   |  |
| <b>DESCRIÇÃO</b>  | <b>QUANTIDADE</b> | <b>PREÇO(R\$)</b>  | <b>VALOR(R\$)</b> |   |  |
| Demanda Ativa Na Ponta(kW)  | 0,0000000         | 19,91244174  | 0,00              |   |  |
| Demanda Ativa Fora de Ponta(kW)   | 0,0000000         | 7,85199830   | 0,00              |   |  |
| Demanda Reativa Exc. Na Ponta(kVAR)   | 0,0000000         | 7,85199830   | 0,00              |   |  |
| Demanda Reativa Exc. Fora de Ponta(kVAR)  | 0,0000000         | 7,85199830   | 0,00              |   |  |
| Uso do Sistema Fio Na Ponta(kW)   | 4.300,0000000     | 19,91244174  | 85.623,49         |   |  |
| Uso do Sistema Fio Fora de Ponta(kW)  | 6.100,0000000     | 7,85199830   | 47.897,18         |   |  |
| Uso do Sistema Encargo Na Ponta(kWh)  | 181.318,7300000   | 0,03417596   | 6.196,74          |   |  |
| Uso Sistema Encargo Fora de Ponta(kWh)  | 1.806.516,2700000 | 0,03417596   | 61.739,42         |   |  |
| Consumo Ativo Na Ponta(kWh)   | 10.790,2700000    | 0,42382431   | 4.573,17          |   |  |
| Consumo Ativo Fora Ponta(kWh)   | 107.505,7300000   | 0,27682530   | 29.760,30         |   |  |
| Consumo Reativo Exc. Na Ponta(kVARh)  | 0,0000000         | 0,25490749   | 0,00              |   |  |
| Consumo Reativo Exc. Fora Ponta(kVARh)  | 0,0000000         | 0,25490749   | 0,00              |   |  |
| Acréscimo Bandeira AMARELA  |                   |  | 2.505,90          |   |  |
| Contribuição Iluminação Pública   |                   |  | 143,09            |   |  |






**ANEXO E**

**WEG DRIVES & CONTROLS – LTDA - AUTOMAÇÃO**

Cotação: QE- 20796945 - rev. 0 - Técnico-comercial      Emissão: 22/08/2016



---

**1. ESCOPO DE FORNECIMENTO**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:**

- Tensão de alimentação.....: 03x 0,8 kV – Trifásico
- Alimentação auxiliar.....: 220, 380 ou 440 V / 2 kVA - Trifásico
- Frequência de alimentação.....: 60 Hz
- Corrente de Saída.....: **85 A**
- Sobrecargas Admissíveis.....: 1,15 x In por 60 seg
- Variação de frequência.....: 0...100Hz
- Rendimento.....: > 98,5%
- Grau de proteção.....: IP 41
- Temperatura de operação.....: 40° C
- Refrigeração.....: Ar/Ar
- Dissipação Térmica Total.....: **25 kW** – (Trafo + Inversor)
- Altitude.....: 1000 m

**ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS:**


- Sistema de operação.....: Unidirecional sem Frenagem
- Forma de operação.....: Manual/Independente
- Tipo de controle.....: Escalar / Vetorial - Sensorless
- Referência local.....: Através de Interface Homem x Máquina
- Referência Remota.....: Sinal de 4 a 20 mA

**EQUIPAMENTOS PARA COMANDO LOCAL** (montados na porta do painel)

- Botões pulsadores Liga / Desliga
- Interface Homem x Máquina para parametrização e referência local de velocidade
- Botão cogumelo Desliga Emergência
- Sinaleiro Ligado
- Chave Seletora Local / Remoto

**CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR (Interno ao Drive)**

- Potência [kVA].....: 500
- Frequência [Hz].....: 60
- Grau de Proteção.....: IP 41
- Enrolamento de primário
  - Tensão nominal [kV].....: 4.16 kV
- Enrolamento de secundário
  - Tensão nominal [kV].....: 3x 1,46 kV (18 pulsos)
- Tensão aplicada : Primário: 20 kV e Secundário: 4 kV
- Grupo de ligação : Dyn1.



Quantidade: 01 Unidade.

**5. PREÇOS**

| Item | Qty | Descrição  | Preço Líquido (R\$) | IPI |
|------|-----|--|---------------------|-----|
| 10   | 01  | Acionamento Inversor de Frequência – MVW01C 0085 T2300 | <b>665.152,00</b>   | 0%  |

## CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO EM MASSA E EM MOL DO GLP

PRESSAÇO DE VAPOR A 37,8°C, 618 Kpa  
 MASSA ESPECÍFICA A 20°C 563,8 kg/m<sup>3</sup>

|                               | % volume | Formula                        | Massa molecular (kg/kmol) | Densidade a 293,15 K (*) | Massa (kg) | % massa | Ode de matéria (kmol) | % mol |
|-------------------------------|----------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------|---------|-----------------------|-------|
| 1,3-BUTADIENO                 | 0,934    | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>  | 54,09                     | 621,11                   | 580,12     | 0,0103  | 10,7250               | 0,010 |
| N-BUTANO                      | 12,328   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58,122                    | 578,80                   | 7135,45    | 0,1271  | 122,7667              | 0,116 |
| ISO-BUTANO                    | 18,54    | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58,122                    | 557,20                   | 10330,49   | 0,1840  | 177,7380              | 0,167 |
| CIS-BUTENO-2                  | 5,798    | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 56,106                    | 621,08                   | 3601,02    | 0,0641  | 64,1825               | 0,060 |
| TRANS-BUTENO-2                | 8,904    | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 56,106                    | 604,70                   | 5384,25    | 0,0959  | 95,9657               | 0,090 |
| ISO-BUTENO                    | 14,236   | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 56,106                    | 594,20                   | 8459,03    | 0,1506  | 150,7687              | 0,142 |
| BUTENO-1                      | 11,23    | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 56,106                    | 595,10                   | 6682,97    | 0,1190  | 119,1133              | 0,112 |
| PROPANO                       | 21,524   | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 44,096                    | 500,50                   | 10772,76   | 0,1918  | 244,3025              | 0,230 |
| PROPENO                       | 5,794    | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 42,08                     | 513,90                   | 2977,54    | 0,0530  | 70,7589               | 0,067 |
| METANO                        | 0,01     | CH <sub>4</sub>                | 16,042                    | 242,68                   | 2,43       | 0,0000  | 0,1513                | 0,000 |
| ETANO                         | 0,45     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 30,069                    | 339,90                   | 152,96     | 0,0027  | 5,0868                | 0,005 |
| BUTANOS                       | 71,66    | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58,124                    | 578,80                   | 41476,81   | 0,7386  | 713,5918              | 0,672 |
| PENTANOS E MAIS PESADOS (***) | 0,118    | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 72,149                    | 626,22                   | 73,89      | 0,0013  | 1,0242                | 0,001 |
| TOTAL                         |          |                                |                           |                          | 56152,90   | 1,00    | 1062,58               | 1,001 |

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| Densidade da Mistura                 | 562,28 |
| Desvio em relação a densidade medida | 0,27%  |

\* Informações de densidade obtidas da tabela E.2 de Brasil (2013), exceto os valores em amarelo.

\*\* Para os valores não encontrados (em amarelo) foram obtidas as densidades d60 (razão entre a massa específica do produto a 60°F e a densidade da água a 60°F) a partir de Maxwell (1968), que posteriormente foram convertidas a d20 como segue abaixo.

\*\*\* Foram consideradas apenas as informações do pentano

|                         |          |        |                     |
|-------------------------|----------|--------|---------------------|
| 1,3-BUTADIENO           | d20      | d60/60 | d20/4 BRASIL (2013) |
| N-BUTANO                | 0,621085 | 0,627  | 621,11              |
| ISO-BUTANO              | 0,57902  | 0,584  | 578,80              |
| CIS-BUTENO-2            | 0,55763  | 0,563  | 557,20              |
| TRANS-BUTENO-2          | 0,621085 | 0,627  |                     |
| ISO-BUTENO              | 0,604733 | 0,610  |                     |
| BUTENO-1                | 0,594944 | 0,600  | 594,20              |
| PROPENO                 | 0,489929 | 0,601  | 595,10              |
| METANO                  | 0,489774 | 0,508  | 500,50              |
| ETANO                   | 0,514266 | 0,522  | 513,90              |
| PENTANOS E MAIS PESADOS | 0,242681 | 0,300  |                     |
|                         | 0,34011  | 0,374  | 339,90              |
|                         | 0,624879 | 0,631  | 626,22              |

| d60   | d20   |
|-------|-------|
| 0,627 | 0,621 |
| 0,584 | 0,579 |
| 0,563 | 0,557 |
| 0,600 | 0,594 |
| 0,601 | 0,595 |
| 0,508 | 0,501 |
| 0,522 | 0,514 |
| 0,374 | 0,340 |
| 0,631 | 0,626 |

APÊNDICE B

| condição rotineira    |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| Legenda               |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| FP= Fator de Potência |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| I=Corrente(A)         |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| T=Tensão (V)          |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| POT=Potência (W)      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| Xmed=Corrigido        |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| Xmed=Médio            |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| Xat=Ativo             |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| Xrea=Reativa          |      |      |      |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |            |            |            |
| Arquivo               | TA   | TB   | TC   | IA    | IB    | IC    | FPA   | FPB   | FPC   | FPCorA | FPCorB | FPCorC | FPMIED | POT        | POTat      | POTrea     |
| trab2                 | 2330 | 2330 | 2330 | 43,83 | 46,8  | 43,41 | 0,41  | 0,408 | 0,41  | 0,811  | 0,810  | 0,811  | 0,811  | 180,314,11 | 146,171,79 | 105,492,08 |
| teste3                | 2330 | 2330 | 2330 | 43,53 | 46,62 | 43,31 | 0,405 | 0,407 | 0,405 | 0,808  | 0,809  | 0,808  | 0,808  | 179,533,88 | 145,126,09 | 105,778,22 |
| reg3                  | 2330 | 2330 | 2330 | 43,46 | 46,74 | 43,35 | 0,41  | 0,411 | 0,41  | 0,811  | 0,812  | 0,811  | 0,811  | 178,883,90 | 145,137,45 | 104,655,34 |
| trab5                 | 2330 | 2330 | 2330 | 42,18 | 45,46 | 42,17 | 0,396 | 0,397 | 0,396 | 0,802  | 0,803  | 0,802  | 0,802  | 174,623,80 | 140,109,44 | 104,306,99 |
| trab9                 | 2320 | 2320 | 2320 | 42,73 | 45,98 | 42,77 | 0,403 | 0,409 | 0,403 | 0,807  | 0,810  | 0,807  | 0,808  | 176,111,23 | 142,306,53 | 103,761,65 |
| Média                 | 2326 | 2326 | 2326 | 43,15 | 46,32 | 43,00 | 0,405 | 0,406 | 0,405 | 0,808  | 0,809  | 0,808  | 0,808  | 177,893,38 | 143,770,26 | 104,798,86 |

| Refrigeração |                |                   |                   |                   |               |              |  |  |  |  |  |  |
|--------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------|--|--|--|--|--|--|
| Medição      | Tensão (A/B/C) | Corrente (A/B/C)  | FP (A/B/C)        | Fpor              | Período       | Operação     |  |  |  |  |  |  |
| reg3sim      | 2250/2260/2250 | 46,13/49,67/46,48 | 0,438/0,449/0,438 | 0,829/0,836/0,829 | 10:43 à 10:46 | Refrigeração |  |  |  |  |  |  |
| B-0225B      | 2250/2260/2250 | 51,51/52          | 0,438/0,449/0,439 | 0,829/0,836/0,830 | 10:43 à 10:46 | Refrigeração |  |  |  |  |  |  |

| Aquecimento |                |                   |                   |                   |               |             |  |  |  |  |  |  |
|-------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| Medição     | Tensão (A/B/C) | Corrente (A/B/C)  | FP (A/B/C)        | Fpor              | Período       | Operação    |  |  |  |  |  |  |
| reg3sim     | 2250/2260/2250 | 46,13/49,67/46,48 | 0,438/0,449/0,438 | 0,829/0,836/0,829 | 10:34 à 10:39 | Aquecimento |  |  |  |  |  |  |
| B-0225B     | 2250/2260/2250 | 51,51/52          | 0,438/0,449/0,438 | 0,829/0,836/0,829 | 10:34 à 10:40 | Aquecimento |  |  |  |  |  |  |

| Regeneração |                |                  |                   |                   |               |             |  |  |  |  |  |  |
|-------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| Medição     | Tensão (A/B/C) | Corrente (A/B/C) | FP (A/B/C)        | Fpor              | Período       | Operação    |  |  |  |  |  |  |
| reg3sim     | 2250/2260/2250 | 45,47/48,97/45,8 | 0,434/0,446/0,434 | 0,829/0,836/0,829 | 10:34 à 10:39 | Regeneração |  |  |  |  |  |  |
| B-0225B     | 2250/2260/2250 | 50,51/52         | 0,434/0,446/0,435 | 0,829/0,836/0,830 | 10:34 à 10:40 | Regeneração |  |  |  |  |  |  |

| Regeneração |                |                   |                   |                   |               |              |  |  |  |  |  |  |
|-------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------|--|--|--|--|--|--|
| Medição     | Tensão (A/B/C) | Corrente (A/B/C)  | FP (A/B/C)        | Fpor              | Período       | Operação     |  |  |  |  |  |  |
| reg3sim     | 2250/2250/2250 | 46,37/49,95/46,79 | 0,440/0,452/0,440 | 0,829/0,836/0,829 | 10:34 à 10:39 | Regene ração |  |  |  |  |  |  |
| B-0225B     | 2250/2250/2250 | 52,51/51          | 0,434/0,446/0,435 | 0,829/0,836/0,830 | 10:34 à 10:40 | Regeneração  |  |  |  |  |  |  |

| Medição | TA   | TB   | TC   | IA    | IB    | IC    | FPA   | FPB   | FPC   | FPCorA | FPCorB | FPCorC | FPMIED | POT        | POTat      | POTrea     |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| reg3sim | 2250 | 2250 | 2250 | 46,37 | 49,95 | 46,79 | 0,44  | 0,452 | 0,44  | 0,83   | 0,837  | 0,83   | 0,832  | 185,905,34 | 154,755,64 | 103,135,75 |
| B-0225B | 2250 | 2250 | 2250 | 52    | 51    | 51    | 0,44  | 0,452 | 0,44  | 0,83   | 0,837  | 0,83   | 0,832  | 200,051,87 | 166,506,81 | 110,983,90 |
| Média   | 2250 | 2250 | 2250 | 46,37 | 49,95 | 46,79 | 0,440 | 0,452 | 0,440 | 0,830  | 0,837  | 0,830  | Soma   | 385,957,21 | 321,262,45 | 214,119,66 |

**APÉNDICE C**

| Trocador | Data       | Temperatura (°C) |          |                 |                 | Pressão (Kgf/cm²) |               |          |               | Vazão (Kg/h) |          |          |          | Entalpia (KJ/Kg)        |                       |   |  | η | Observações |
|----------|------------|------------------|----------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------|----------|---------------|--------------|----------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|---|--|---|-------------|
|          |            | Água ent         | Água sai | Gás ent.        | Gás sai         | Água ent          | Água sai      | Gás ent. | Gás sai       | Água         | Gás      | Água ent | Água sai | Gás ent.                | Gás sai               |   |  |   |             |
| EA-108   | 12/08/2016 | 27,7             | 29       | NR              | NR              | 1,4               | igual entrada | NR       | igual entrada | 18,458,82    | 1.222,50 | -2436,59 | -2480,27 | x                       | x                     | Compressor GB-103 a 75%   |  |   |             |
| EA-108   | 26/08/2016 | 26,8             | 27,4     | 70,8<br>(95,42) | 29,8<br>(28,89) | 1,4               | igual entrada | 13,49    | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | -2440,49 | -2457,89 | 96,9959984              | -362,5377424          | Medições realizadas com pistola injeção (pelo instrumento) GB-103 a 100%                            |  |   |             |
| EA-109   | 20/05/2016 | NR               | NR       | 94,91           | 41,73           | 2,4               | igual entrada | 15,2     | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | x        | x        | 90,5635168              | -329,496276           | Operou o GB-104 a 100% T <sub>sai</sub> =TT-11101, Pent=PT1156, Tent=TT-1157                        |  |   |             |
| EA-109   | 14/06/2016 | NR               | NR       | 96,85           | 31,94           | 1,38              | igual entrada | 11,81    | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | x        | x        | 104,9292808             | -354,8647048          | Operou o GB-104 a 100% T <sub>sai</sub> =TT-11101, Pent=PT1156, Tent=TT-1157                        |  |   |             |
| EA-109   | 05/07/2016 | 26,4             | 29,8     | 105,71          | 31,62           | 1,56              | igual entrada | 11,13    | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | -2442,21 | -2427,5  | 126,0007416             | -355,6956472          | Dados coletados do sistema supervisão   |  |   |             |
| EA-109   | 07/08/2016 | 27,2             | NR       | NR              | NR              | 7,9               | igual entrada | NR       | NR            | 18,458,82    | 1.630    | x        | x        | x                       | x                     | Dados de área   |  |   |             |
| EA-110   | 18/05/2016 | 28,6             | 30,1     | 106,01          | 41,54           | 1,4               | igual entrada | 15,03    | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | 119,918  | 126,188  | 116,2311016             | -329,9958456          | Operou o GB-105 a 100% T <sub>sai</sub> =TT-11101, Pent=PT1156, Tent=TT-1157                        |  |   |             |
| EA-110   | 12/08/2016 | NR               | NR       | NR              | NR              | 3,47              | igual entrada | NR       | igual entrada | 18,458,82    | 1.630    | x        | x        | x                       | x                     | Compressor GB-105 a 100%  |  |   |             |
| EA-112   | 18/05/2016 | NR               | NR       | 83,77           | 26,2            | 3,47              | igual entrada | 11,35    | igual entrada | 224,897,30   | 14,625   | x        | x        | 78,1659064              | -369,2564072          | GB-101B a 75% às 12:30  |  |   |             |
| EA-112   | 20/05/2016 | NR               | NR       | 88,38           | 26,41           | 2,4               | igual entrada | 11,53    | igual entrada | 224,897,30   | 19,500   | x        | x        | 87,4669384              | -368,8250392          | GB-101SA 75% as 17:40   |  |   |             |
| EA-112   | 14/06/2016 | NR               | NR       | 73,96           | 25,54           | 1,38              | igual entrada | 10,34    | igual entrada | 224,897,30   | 14,625   | x        | x        | 60,6788784              | -371,041304           | Dados coletados do sistema supervisão   |  |   |             |
| EA-112   | 05/07/2016 | NR               | NR       | 90              | 26              | NR                | NR            | 12,29    | igual entrada | 224,897,30   | 19,500   | x        | x        | 88,7139336              | -369,8212456          | Dados coletados do sistema supervisão   |  |   |             |
| EA-112   | 26/08/2016 | 26,6             | 28,4     | 68,8<br>(94,95) | 28,8<br>(25,13) | 1,46              | igual entrada | 13,14    | igual entrada | 224,897,30   | 39,000   | -2441,35 | -2433,56 | 96,9959984              | -371,9563448          | Medições realizadas com pistola injeção (pelo instrumento) GB-101B e S a 100%                       |  |   |             |
| EA-112   | 09/09/2016 | 28,5             | 31,3     | 86,7<br>(92,78) | 29,6<br>(25,88) | 2,86              | igual entrada | 15,44    | igual entrada | 224,897,30   | 14,625   | -2432,98 | -2420,89 | 84,9452416              | -370,0007432          | GB-101s a 75%   |  |   |             |
| EA-115   | 18/05/2016 | 24,9             | 27       | 30,1*           | 28,6*           | 0,9               | igual entrada | alm*     | igual entrada | 275,714,70   | 100,000  | -2448,78 | -2439,68 | -2436,25                | -2432,74              | P entrada de água assumida como a pressão nos filtros do SEGA S. * Valores de água doce             |  |   |             |
| EA-115   | 14/06/2016 | NR               | NR       | NR              | NR              | 1,38              | igual entrada | alm*     | igual entrada | 275,714,70   | 100,000  | x        | x        | x                       | x                     | P entrada de água assumida como a pressão nos filtros do SEGA S. * Valores de água doce             |  |   |             |
| EA-115   | 26/08/2016 | 25,4             | 27,8     | 28,7*           | 25,5*           | 1,1               | igual entrada | alm*     | igual entrada | 275,714,70   | 100,000  | -2446,59 | -2436,19 | -2432,3                 | -2446,17              | Medições realizadas com pistola injeção (pelo instrumento) GB-101B e S a 100%                       |  |   |             |
| EA-105   | 18/05/2016 | x                | x        | 87,03           | 36,04           | 2,04              | igual entrada | 15,86    | igual entrada | 708,119,58   | 39,000   | x        | x        | 53,8421744              | -344,2862976          | GB-102A e GB-102S a 100%. Operação teste realizada em 18/05/16                                      |  |   |             |
| EA-105   | 12/08/2016 | 28,6             | 36,5     | 81,61           | 30,4            | 2,11              | igual entrada | 13,71    | igual entrada | 708,119,58   | 39,000   | -2432,63 | -2398,59 | 65,8636912              | -0,686964299          | Operou com a descarga do compressor de Flash devido a problemas no EA-112, GB-101S e GB-101B a 100% |  |   |             |
| EA-105   | 20/05/2016 | 27,1             | 24       | -25,29          | 15,81           | 2,4               | igual entrada | 8,17     | igual entrada | 732,531,32   | 127,724  | 113,648  | 100,684  | -489,850168             | -395,0796392          | Operou com a descarga do compressor de Flash devido a problemas no EA-112, GB-101S e GB-101B a 100% |  |   |             |
| P-0301   | 14/06/2016 | 26,8             | 24       | -24,62          | 12,47           | 2,1               | igual entrada | 12,44    | igual entrada | 732,531,32   | 179,188  | 112,294  | 100,684  | -487,963184             | -402,894096           | Operou com a descarga do compressor de Flash devido a problemas no EA-112, GB-101S e GB-101B a 100% |  |   |             |
| EA-116   | PROJETO    | 20               | 38       | 149             | 30              | 20                | igual entrada | 0,4      | igual entrada | 42,258,60    | 6,000    | -2470,01 | -2392,17 | 242,6761 / 73,4<br>(FD) | 7,3515 / 22,4<br>(FD) | Valores FD obtidos na Folha de Dados do equipamento.  |  |   |             |

## APÊNDICE D

### Comparação valores ProPhyPlus-Tabelas

| Comp   | Metano    |          |
|--------|-----------|----------|
| Temp0  | 200K      |          |
| Tempf  | 350K      |          |
| Press  | 2MPa      | Δ        |
| Entovw | 370,2     | 358,4    |
| Entfvw | 728,6     |          |
| EntOpf | 103,7351  |          |
| Entfpf | -255,0771 | -358,812 |

| Comp   | Metano   |         |
|--------|----------|---------|
| Temp0  | 450K     |         |
| Tempf  | 275K     |         |
| Press  | 10MPa    | Δ       |
| Entovw | 955,3    | -505,2  |
| Entfvw | 450,1    |         |
| EntOpf | 334,197  |         |
| Entfpf | -176,353 | -510,55 |

| Comp   | Metano   |        |
|--------|----------|--------|
| Temp0  | 275K     |        |
| Tempf  | 450K     |        |
| Press  | 10MPa    | Δ      |
| Entovw | 450,1    | 505,2  |
| Entfvw | 955,3    |        |
| EntOpf | -176,353 |        |
| Entfpf | 334,197  | 510,55 |

#### Legenda

Comp= Componente  
 Temp0= Temperatura inicial  
 Tempf= Temperatura final  
 Press= Pressão  
 Entovw= Entalpia inicial Van Willen  
 Entfvw= Entalpia final Van Willen  
 EntOpf= Entalpia inicial ProPhyPlus  
 Entfpf= Entalpia final ProPhyPlus

| Comp   | Nitrogênio |          |
|--------|------------|----------|
| Temp0  | 150K       |          |
| Tempf  | 275K       |          |
| Press  | 1MPa       | Δ        |
| Entovw | 147,062    | 135,681  |
| Entfvw | 282,743    |          |
| EntOpf | -162,8676  |          |
| Entfpf | -26,6689   | 136,1987 |

| Comp   | Nitrogênio |          |
|--------|------------|----------|
| Temp0  | 300K       |          |
| Tempf  | 100K       |          |
| Press  | 20MPa      | Δ        |
| Entovw | 401,649    | -368,005 |
| Entfvw | 33,644     |          |
| EntOpf | -26,356    |          |
| Entfpf | -375,4922  | -349,136 |

| Comp   | GLP                      |         |
|--------|--------------------------|---------|
| Temp0  | 106,01C                  |         |
| Tempf  | 41,54C                   |         |
| Press  | 15,03 Kg/cm <sup>2</sup> | Δ       |
| Entovw | 810,38                   | -429,63 |
| Entfvw | 380,75                   |         |
| EntOpf | 116,2537                 |         |
| Entfpf | -329,9959                | -446,25 |

#### Notas

\*Para o GLP foram utilizadas as planilhas de Maxwell (1968)  
 \*Para os demais componente foram utilizadas as tabelas de Sonntag, Borgnakke e Wylen (2003)

| Comp   | GLP                      |          |
|--------|--------------------------|----------|
| Temp0  | 96,85C                   |          |
| Tempf  | 31,94C                   |          |
| Press  | 11,81 Kg/cm <sup>2</sup> | Δ        |
| Entovw | 802,12                   | -443,27  |
| Entfvw | 358,85                   |          |
| EntOpf | 104,9293                 |          |
| Entfpf | -354,8647                | -459,794 |

| Comp   | GLP                     |         |
|--------|-------------------------|---------|
| Temp0  | 94,91C                  |         |
| Tempf  | 41,73C                  |         |
| Press  | 15,2 Kg/cm <sup>2</sup> | Δ       |
| Entovw | 786,26                  | -403,44 |
| Entfvw | 382,82                  |         |
| EntOpf | 90,5635                 |         |
| Entfpf | -329,4963               | -420,06 |

| Comp   | GLP                      |          |
|--------|--------------------------|----------|
| Temp0  | 88,38C                   |          |
| Tempf  | 26,41C                   |          |
| Press  | 11,53 Kg/cm <sup>2</sup> | Δ        |
| Entovw | 784,58                   | -440,23  |
| Entfvw | 344,35                   |          |
| EntOpf | 87,4669                  |          |
| Entfpf | -368,825                 | -456,292 |

| Comp   | Água                  |       |
|--------|-----------------------|-------|
| Temp0  | 27,7C                 |       |
| Tempf  | 29C                   |       |
| Press  | 1,4Kg/cm <sup>2</sup> | Δ     |
| Entovw | 116,156               | 5,434 |
| Entfvw | 121,59                |       |
| EntOpf | -2436,59              |       |
| Entfpf | -2430,27              | 6,32  |

| Comp   | Água                  |       |
|--------|-----------------------|-------|
| Temp0  | 27,7C                 |       |
| Tempf  | 29C                   |       |
| Press  | 1,4Kg/cm <sup>2</sup> | Δ     |
| Entovw | 116,156               | 5,434 |
| Entfvw | 121,59                |       |
| EntOpf | -2436,59              |       |
| Entfpf | -2430,27              | 6,32  |

| Comp   | Água     |         |
|--------|----------|---------|
| Temp0  | 28,7C    |         |
| Tempf  | 25,5C    |         |
| Press  | atm      | Δ       |
| Entovw | 120,336  | -13,376 |
| Entfvw | 106,96   |         |
| EntOpf | -2432,3  |         |
| Entfpf | -2446,17 | -13,87  |

**APÊNDICE E**

-2015



| EA-112     |          |            |          |           | EA-109                |                            |            |          |          | EA-108     |          |            |          |           |
|------------|----------|------------|----------|-----------|-----------------------|----------------------------|------------|----------|----------|------------|----------|------------|----------|-----------|
| 01/01/2015 | 00:00:00 | 02/01/2015 | 00:40:00 | 24:40:00  | 16/06/2015            | 09:40:00                   | 16/06/2015 | 09:50:00 | 0:10:00  | 01/01/2015 | 00:00:00 | 03/01/2015 | 23:50:00 | 71:50:00  |
| 02/01/2015 | 12:20:00 | 02/01/2015 | 13:40:00 | 1:20:00   | 18/06/2015            | 14:30:00                   | 18/06/2015 | 17:10:00 | 2:40:00  | 04/01/2015 | 02:30:00 | 05/01/2015 | 07:20:00 | 28:50:00  |
| 03/01/2015 | 12:10:00 | 06/01/2015 | 03:30:00 | 63:20:00  | 18/06/2015            | 17:20:00                   | 18/06/2015 | 21:20:00 | 4:00:00  | 05/01/2015 | 12:10:00 | 06/01/2015 | 07:10:00 | 19:00:00  |
| 06/01/2015 | 07:40:00 | 06/01/2015 | 18:50:00 | 11:10:00  | 22/06/2015            | 10:30:00                   | 22/06/2015 | 13:30:00 | 3:00:00  | 06/01/2015 | 10:20:00 | 06/01/2015 | 18:40:00 | 8:20:00   |
| 09/01/2015 | 09:40:00 | 11/01/2015 | 01:30:00 | 39:50:00  | 22/06/2015            | 13:40:00                   | 26/06/2015 | 11:20:00 | 93:40:00 | 07/01/2015 | 00:50:00 | 07/01/2015 | 23:30:00 | 22:40:00  |
| 11/01/2015 | 08:10:00 | 12/01/2015 | 18:40:00 | 34:30:00  | 29/06/2015            | 09:50:00                   | 29/06/2015 | 10:30:00 | 0:40:00  | 08/01/2015 | 03:40:00 | 09/01/2015 | 04:40:00 | 25:00:00  |
| 13/01/2015 | 21:00:00 | 17/01/2015 | 04:20:00 | 79:20:00  | 29/06/2015            | 15:40:00                   | 29/06/2015 | 17:10:00 | 1:30:00  | 09/01/2015 | 04:50:00 | 09/01/2015 | 11:50:00 | 7:00:00   |
| 17/01/2015 | 07:00:00 | 29/01/2015 | 14:10:00 | 295:10:00 | 30/06/2015            | 09:20:00                   | 30/06/2015 | 11:40:00 | 2:20:00  | 09/01/2015 | 19:10:00 | 14/01/2015 | 04:00:00 | 104:50:00 |
| 29/01/2015 | 16:50:00 | 29/01/2015 | 20:20:00 | 3:30:00   |                       |                            |            |          | 98:10:00 | 14/01/2015 | 13:50:00 | 16/01/2015 | 08:50:00 | 43:00:00  |
| 30/01/2015 | 09:30:00 | 30/01/2015 | 19:20:00 | 9:50:00   |                       |                            |            |          |          | 16/01/2015 | 16:30:00 | 17/01/2015 | 14:10:00 | 21:40:00  |
| 30/01/2015 | 19:50:00 | 31/01/2015 | 06:10:00 | 10:20:00  | Não Operou            |                            |            |          |          | 18/01/2015 | 00:30:00 | 18/01/2015 | 02:00:00 | 1:30:00   |
| 31/01/2015 | 06:20:00 | 31/01/2015 | 10:40:00 | 4:20:00   |                       |                            |            |          |          | 18/01/2015 | 07:30:00 | 19/01/2015 | 18:40:00 | 35:10:00  |
| 31/01/2015 | 11:00:00 | 31/01/2015 | 11:50:00 | 0:50:00   |                       |                            |            |          |          | 19/01/2015 | 18:50:00 | 19/01/2015 | 23:30:00 | 4:40:00   |
| 31/01/2015 | 20:30:00 | 18/02/2015 | 20:20:00 | 431:50:00 |                       |                            |            |          |          | 19/01/2015 | 23:40:00 | 20/01/2015 | 00:50:00 | 1:10:00   |
| 24/02/2015 | 08:00:00 | 24/02/2015 | 20:50:00 | 12:50:00  |                       |                            |            |          |          | 20/01/2015 | 14:30:00 | 21/01/2015 | 09:30:00 | 19:00:00  |
| 26/02/2015 | 09:00:00 | 26/02/2015 | 13:10:00 | 4:10:00   | Tempo total: 180 dias |                            |            |          |          | 21/01/2015 | 10:30:00 | 21/01/2015 | 17:40:00 | 7:10:00   |
| 26/02/2015 | 13:50:00 | 26/02/2015 | 14:20:00 | 0:30:00   | PIC 2058              | Descarga Flash             |            |          |          | 21/01/2015 | 19:40:00 | 22/01/2015 | 16:10:00 | 20:30:00  |
| 02/03/2015 | 16:10:00 | 16/03/2015 | 11:20:00 | 43:10:00  | PIC 1156              | Descarga GB-103            |            |          |          | 22/01/2015 | 19:30:00 | 31/01/2015 | 10:30:00 | 207:00:00 |
| 04/03/2015 | 13:20:00 | 08/03/2015 | 05:10:00 | 87:50:00  | PIC 1256              | Descarga GB-104            |            |          |          | 31/01/2015 | 10:40:00 | 31/01/2015 | 10:50:00 | 0:10:00   |
| 08/03/2015 | 09:30:00 | 14/03/2015 | 03:40:00 | 138:10:00 | PIC 1356              | Descarga GB-105            |            |          |          | 31/01/2015 | 11:30:00 | 01/02/2015 | 12:30:00 | 25:00:00  |
| 14/03/2015 | 07:10:00 | 15/03/2015 | 23:00:00 | 39:50:00  | FT-1164               | Vazão para trombone        |            |          |          | 01/02/2015 | 17:00:00 | 02/02/2015 | 05:10:00 | 12:10:00  |
| 16/03/2015 | 13:40:00 | 16/03/2015 | 15:20:00 | 1:40:00   | TT-1166               | Temperatura saída trombone |            |          |          | 02/02/2015 | 08:00:00 | 02/02/2015 | 12:30:00 | 4:30:00   |
| 17/03/2015 | 08:40:00 | 18/03/2015 | 14:40:00 | 30:00:00  |                       |                            |            |          |          | 02/02/2015 | 17:40:00 | 04/02/2015 | 20:40:00 | 51:00:00  |
| 18/03/2015 | 15:10:00 | 23/03/2015 | 22:40:00 | 127:30:00 |                       |                            |            |          |          | 05/02/2015 | 04:40:00 | 05/02/2015 | 14:40:00 | 10:00:00  |
| 24/03/2015 | 12:20:00 | 24/03/2015 | 16:50:00 | 4:30:00   |                       |                            |            |          |          | 06/02/2015 | 01:20:00 | 06/02/2015 | 17:50:00 | 16:30:00  |
| 26/03/2015 | 08:20:00 | 27/03/2015 | 10:50:00 | 26:30:00  |                       |                            |            |          |          | 06/02/2015 | 21:50:00 | 13/02/2015 | 15:30:00 | 161:40:00 |
| 31/03/2015 | 10:40:00 | 31/03/2015 | 21:20:00 | 10:40:00  |                       |                            |            |          |          | 13/02/2015 | 18:10:00 | 13/02/2015 | 20:00:00 | 1:50:00   |
| 02/04/2015 | 16:40:00 | 02/04/2015 | 20:20:00 | 3:40:00   |                       |                            |            |          |          | 14/02/2015 | 16:00:00 | 26/02/2015 | 08:50:00 | 280:50:00 |
| 03/04/2015 | 08:10:00 | 04/04/2015 | 06:50:00 | 22:40:00  |                       |                            |            |          |          | 26/02/2015 | 13:40:00 | 26/02/2015 | 16:50:00 | 3:10:00   |
| 04/04/2015 | 07:30:00 | 04/04/2015 | 07:50:00 | 0:20:00   |                       |                            |            |          |          | 26/02/2015 | 17:00:00 | 02/03/2015 | 16:40:00 | 95:40:00  |
| 04/04/2015 | 08:10:00 | 04/04/2015 | 08:20:00 | 0:10:00   |                       |                            |            |          |          | 02/03/2015 | 19:30:00 | 08/03/2015 | 19:40:00 | 144:10:00 |
| 04/04/2015 | 08:30:00 | 07/04/2015 | 18:10:00 | 81:40:00  |                       |                            |            |          |          | 08/03/2015 | 23:20:00 | 09/03/2015 | 19:00:00 | 19:40:00  |
| 07/04/2015 | 20:20:00 | 09/04/2015 | 04:40:00 | 32:20:00  |                       |                            |            |          |          | 10/03/2015 | 07:50:00 | 10/03/2015 | 12:50:00 | 5:00:00   |
| 14/04/2015 | 14:20:00 | 16/04/2015 | 03:20:00 | 37:00:00  |                       |                            |            |          |          | 11/03/2015 | 07:10:00 | 17/03/2015 | 11:30:00 | 148:20:00 |
| 16/04/2015 | 09:20:00 | 18/04/2015 | 23:40:00 | 62:20:00  |                       |                            |            |          |          | 17/03/2015 | 13:40:00 | 17/03/2015 | 17:40:00 | 4:00:00   |
| 19/04/2015 | 07:20:00 | 19/04/2015 | 15:30:00 | 8:10:00   |                       |                            |            |          |          | 17/03/2015 | 21:00:00 | 18/03/2015 | 13:00:00 | 16:00:00  |
| 21/04/2015 | 09:30:00 | 21/04/2015 | 17:40:00 | 8:10:00   |                       |                            |            |          |          | 18/03/2015 | 14:40:00 | 18/03/2015 | 15:20:00 | 0:40:00   |
| 22/04/2015 | 09:40:00 | 22/04/2015 | 17:40:00 | 8:00:00   |                       |                            |            |          |          | 18/03/2015 | 19:40:00 | 19/03/2015 | 06:40:00 | 11:00:00  |
| 23/04/2015 | 08:10:00 | 23/04/2015 | 11:00:00 | 2:50:00   |                       |                            |            |          |          | 19/03/2015 | 09:10:00 | 20/03/2015 | 16:50:00 | 31:40:00  |
| 23/04/2015 | 13:40:00 | 23/04/2015 | 16:20:00 | 2:40:00   |                       |                            |            |          |          | 20/03/2015 | 19:00:00 | 27/03/2015 | 01:10:00 | 150:10:00 |
| 23/04/2015 | 21:50:00 | 09/05/2015 | 14:40:00 | 376:50:00 |                       |                            |            |          |          | 27/03/2015 | 11:30:00 | 31/03/2015 | 14:20:00 | 98:50:00  |
| 09/05/2015 | 21:50:00 | 11/05/2015 | 17:50:00 | 44:00:00  |                       |                            |            |          |          | 31/03/2015 | 19:10:00 | 02/04/2015 | 06:20:00 | 35:10:00  |
| 12/05/2015 | 09:40:00 | 12/05/2015 | 09:50:00 | 0:10:00   |                       |                            |            |          |          | 02/04/2015 | 06:50:00 | 03/04/2015 | 23:20:00 | 40:30:00  |
| 12/05/2015 | 10:00:00 | 14/05/2015 | 19:00:00 | 57:00:00  |                       |                            |            |          |          | 04/04/2015 | 01:30:00 | 14/04/2015 | 14:30:00 | 253:00:00 |
| 15/05/2015 | 10:40:00 | 19/05/2015 | 16:50:00 | 102:10:00 |                       |                            |            |          |          | 14/04/2015 | 19:20:00 | 15/04/2015 | 08:20:00 | 13:00:00  |
| 20/05/2015 | 10:30:00 | 20/05/2015 | 11:40:00 | 1:10:00   |                       |                            |            |          |          | 15/04/2015 | 21:10:00 | 16/04/2015 | 09:20:00 | 12:10:00  |
| 20/05/2015 | 15:50:00 | 20/05/2015 | 16:10:00 | 0:20:00   |                       |                            |            |          |          | 16/04/2015 | 15:50:00 | 17/04/2015 | 09:40:00 | 17:50:00  |
| 20/05/2015 | 16:20:00 | 20/05/2015 | 16:40:00 | 0:20:00   |                       |                            |            |          |          | 17/04/2015 | 09:50:00 | 17/04/2015 | 14:10:00 | 4:20:00   |
| 20/05/2015 | 16:50:00 | 20/05/2015 | 18:50:00 | 2:00:00   |                       |                            |            |          |          | 17/04/2015 | 19:20:00 | 20/04/2015 | 13:20:00 | 66:00:00  |
| 22/05/2015 | 08:50:00 | 23/05/2015 | 09:20:00 | 24:30:00  |                       |                            |            |          |          | 20/04/2015 | 18:00:00 | 22/04/2015 | 05:30:00 | 35:30:00  |
| 23/05/2015 | 09:30:00 | 24/05/2015 | 21:10:00 | 35:40:00  |                       |                            |            |          |          | 22/04/2015 | 13:50:00 | 22/04/2015 | 21:20:00 | 7:30:00   |
| 26/05/2015 | 08:30:00 | 29/05/2015 | 17:50:00 | 81:20:00  |                       |                            |            |          |          | 23/04/2015 | 00:30:00 | 23/04/2015 | 06:30:00 | 6:00:00   |
| 30/05/2015 | 19:10:00 | 06/06/2015 | 05:20:00 | 154:10:00 |                       |                            |            |          |          | 23/04/2015 | 08:00:00 | 23/04/2015 | 16:50:00 | 8:50:00   |
| 06/06/2015 | 08:10:00 | 06/06/2015 | 09:40:00 | 1:30:00   |                       |                            |            |          |          | 23/04/2015 | 21:00:00 | 23/04/2015 | 22:00:00 | 1:00:00   |
| 08/06/2015 | 08:20:00 | 10/06/2015 | 00:50:00 | 40:30:00  |                       |                            |            |          |          | 24/04/2015 | 00:00:00 | 25/04/2015 | 23:30:00 | 47:30:00  |
| 11/06/2015 | 03:20:00 | 11/06/2015 | 06:10:00 | 2:50:00   |                       |                            |            |          |          | 26/04/2015 | 04:40:00 | 26/04/2015 | 05:00:00 | 0:20:00   |
| 11/06/2015 | 07:00:00 | 11/06/2015 | 07:20:00 | 0:20:00   |                       |                            |            |          |          | 26/04/2015 | 05:40:00 | 26/04/2015 | 17:10:00 | 11:30:00  |
| 11/06/2015 | 11:20:00 | 11/06/2015 | 16:10:00 | 4:50:00   |                       |                            |            |          |          | 27/04/2015 | 11:10:00 | 27/04/2015 | 15:50:00 | 4:40:00   |
| 11/06/2015 | 21:10:00 | 12/06/2015 | 23:30:00 | 26:20:00  |                       |                            |            |          |          | 27/04/2015 | 19:10:00 | 28/04/2015 | 23:30:00 | 28:20:00  |
| 13/06/2015 | 00:20:00 | 13/06/2015 | 07:40:00 | 7:20:00   |                       |                            |            |          |          | 29/04/2015 | 12:20:00 | 29/04/2015 | 14:30:00 | 2:10:00   |
| 13/06/2015 | 09:10:00 | 13/06/2015 | 10:40:00 | 1:30:00   |                       |                            |            |          |          | 29/04/2015 | 17:00:00 | 29/04/2015 | 18:10:00 | 1:10:00   |
| 13/06/2015 | 12:20:00 | 13/06/2015 | 12:30:00 | 0:10:00   |                       |                            |            |          |          | 30/04/2015 | 02:30:00 | 30/04/2015 | 15:40:00 | 13:10:00  |
| 13/06/2015 | 13:00:00 | 13/06/2015 | 14:50:00 | 1:50:00   |                       |                            |            |          |          | 30/04/2015 | 17:00:00 | 30/04/2015 | 17:50:00 | 0:50:00   |
| 14/06/2015 | 22:40:00 | 15/06/2015 | 22:30:00 | 23:50:00  |                       |                            |            |          |          | 30/04/2015 | 23:20:00 | 02/05/2015 | 07:10:00 | 31:50:00  |
| 16/06/2015 | 09:40:00 | 16/06/2015 | 09:50:00 | 0:10:00   |                       |                            |            |          |          | 02/05/2015 | 10:50:00 | 04/05/2015 | 13:20:00 | 50:30:00  |
| 16/06/2015 | 14:30:00 | 17/06/2015 | 07:30:00 | 17:00:00  |                       |                            |            |          |          | 04/05/2015 | 19:30:00 | 04/05/2015 | 22:50:00 | 3:20:00   |
| 17/06/2015 | 10:20:00 | 18/06/2015 | 00:30:00 | 14:10:00  |                       |                            |            |          |          | 04/05/2015 | 23:30:00 | 04/05/2015 | 23:40:00 | 0:10:00   |
| 18/06/2015 | 12:30:00 | 18/06/2015 | 15:10:00 | 2:40:00   |                       |                            |            |          |          | 05/05/2015 | 13:00:00 | 09/05/2015 | 14:50:00 | 97:50:00  |
| 20/06/2015 | 10:40:00 | 20/06/2015 | 20:20:00 | 9:40:00   |                       |                            |            |          |          | 09/05/2015 | 15:00:00 | 10/05/2015 | 08:10:00 | 17:10:00  |

|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  |            |          |            |          |            |
|------------|----------|------------|----------|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|------------|----------|------------|----------|------------|
| 21/06/2015 | 09:50:00 | 22/06/2015 | 00:10:00 | 14:20:00   |  |  |  |  |  |  |  |  | 10/05/2015 | 10:00:00 | 12/05/2015 | 16:00:00 | 54:00:00   |
| 22/06/2015 | 02:10:00 | 22/06/2015 | 21:20:00 | 19:10:00   |  |  |  |  |  |  |  |  | 12/05/2015 | 16:20:00 | 16/05/2015 | 10:00:00 | 89:40:00   |
| 23/06/2015 | 15:00:00 | 23/06/2015 | 23:20:00 | 8:20:00    |  |  |  |  |  |  |  |  | 16/05/2015 | 13:40:00 | 16/05/2015 | 15:00:00 | 1:20:00    |
| 24/06/2015 | 05:40:00 | 24/06/2015 | 19:00:00 | 13:20:00   |  |  |  |  |  |  |  |  | 16/05/2015 | 17:30:00 | 16/05/2015 | 18:50:00 | 1:20:00    |
| 26/06/2015 | 08:00:00 | 26/06/2015 | 20:50:00 | 12:50:00   |  |  |  |  |  |  |  |  | 16/05/2015 | 20:00:00 | 17/05/2015 | 11:10:00 | 15:10:00   |
| 29/06/2015 | 10:10:00 | 29/06/2015 | 13:00:00 | 2:50:00    |  |  |  |  |  |  |  |  | 18/05/2015 | 01:00:00 | 19/05/2015 | 15:50:00 | 38:50:00   |
| 30/06/2015 | 13:50:00 | 30/06/2015 | 16:20:00 | 2:30:00    |  |  |  |  |  |  |  |  | 19/05/2015 | 17:10:00 | 21/05/2015 | 14:40:00 | 45:30:00   |
|            |          |            |          | 2915:00:00 |  |  |  |  |  |  |  |  | 21/05/2015 | 15:20:00 | 22/05/2015 | 10:10:00 | 18:50:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 22/05/2015 | 12:00:00 | 22/05/2015 | 13:50:00 | 1:50:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 22/05/2015 | 15:50:00 | 26/05/2015 | 09:40:00 | 89:50:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 26/05/2015 | 16:00:00 | 29/05/2015 | 14:10:00 | 70:10:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 29/05/2015 | 17:40:00 | 30/05/2015 | 14:00:00 | 20:20:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 30/05/2015 | 14:30:00 | 30/05/2015 | 19:50:00 | 5:20:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 31/05/2015 | 04:50:00 | 01/06/2015 | 12:40:00 | 31:50:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 01/06/2015 | 17:10:00 | 01/06/2015 | 18:30:00 | 1:20:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 01/06/2015 | 19:00:00 | 03/06/2015 | 06:40:00 | 35:40:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 03/06/2015 | 19:40:00 | 04/06/2015 | 09:40:00 | 14:00:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 05/06/2015 | 10:10:00 | 05/06/2015 | 10:30:00 | 0:20:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 05/06/2015 | 10:40:00 | 08/06/2015 | 18:00:00 | 79:20:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 09/06/2015 | 12:20:00 | 09/06/2015 | 15:10:00 | 2:50:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 09/06/2015 | 17:40:00 | 11/06/2015 | 22:20:00 | 52:40:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 12/06/2015 | 10:10:00 | 12/06/2015 | 12:10:00 | 2:00:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 12/06/2015 | 17:20:00 | 15/06/2015 | 05:40:00 | 60:20:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 15/06/2015 | 19:20:00 | 16/06/2015 | 18:10:00 | 22:50:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 17/06/2015 | 03:10:00 | 18/06/2015 | 15:20:00 | 36:10:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 18/06/2015 | 15:40:00 | 18/06/2015 | 17:00:00 | 1:20:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 18/06/2015 | 17:30:00 | 18/06/2015 | 18:00:00 | 0:30:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 18/06/2015 | 21:00:00 | 20/06/2015 | 10:50:00 | 37:50:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 20/06/2015 | 12:20:00 | 22/06/2015 | 10:50:00 | 46:30:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 22/06/2015 | 11:10:00 | 22/06/2015 | 11:40:00 | 0:30:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 22/06/2015 | 12:20:00 | 22/06/2015 | 13:50:00 | 1:30:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 26/06/2015 | 10:40:00 | 26/06/2015 | 17:40:00 | 7:00:00    |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 26/06/2015 | 19:40:00 | 29/06/2015 | 10:40:00 | 63:00:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  | 29/06/2015 | 10:50:00 | 30/06/2015 | 23:50:00 | 37:00:00   |
|            |          |            |          |            |  |  |  |  |  |  |  |  |            |          |            |          | 3738:20:00 |

-2016

|            | EA-108   |            |          |           | EA-109     |          |            |          | EA-110     |            |            |            | EA-112   |            |            |            |            |          |          |
|------------|----------|------------|----------|-----------|------------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
|            | Inicio   | Fim        | Tempo    |           | Inicio     | Fim      | Tempo      |          | Inicio     | Fim        | Tempo      |            | Inicio   | Fim        | Tempo      |            |            |          |          |
| 18/05/2016 | 10:10:00 | 18/05/2016 | 13:40:00 | 3:30:00   | 19/05/2016 | 10:10:00 | 10:10:00   | 13:00:00 | 18/05/2016 | 00:00:00   | 18/05/2016 | 08:40:00   | 8:40:00  | 18/05/2016 | 08:10:00   | 18/05/2016 | 12:00:00   | 3:50:00  |          |
| 19/05/2016 | 03:10:00 | 20/05/2016 | 15:00:00 | 35:50:00  | 21/05/2016 | 02:10:00 | 21/05/2016 | 06:50:00 | 4:40:00    | 09/08/2016 | 16:50:00   | 09/08/2016 | 17:10:00 | 0:20:00    | 18/05/2016 | 12:10:00   | 19/05/2016 | 06:00:00 | 17:50:00 |
| 20/05/2016 | 15:50:00 | 22/05/2016 | 01:00:00 | 33:10:00  | 21/05/2016 | 19:30:00 | 24/05/2016 | 15:00:00 | 67:30:00   | 20/05/2016 | 17:20:00   | 09/08/2016 | 22:20:00 | 5:00:00    | 20/05/2016 | 17:20:00   | 21/05/2016 | 14:00:00 | 20:40:00 |
| 22/05/2016 | 05:20:00 | 22/05/2016 | 10:30:00 | 5:10:00   | 31/05/2016 | 11:20:00 | 31/05/2016 | 14:50:00 | 3:30:00    | 10/08/2016 | 21:20:00   | 11/08/2016 | 10:20:00 | 13:00:00   | 24/05/2016 | 21:20:00   | 25/05/2016 | 13:10:00 | 15:50:00 |
| 24/05/2016 | 03:50:00 | 24/05/2016 | 04:00:00 | 0:10:00   | 02/06/2016 | 13:50:00 | 02/06/2016 | 14:20:00 | 0:30:00    | 12/08/2016 | 14:10:00   | 12/08/2016 | 16:00:00 | 1:50:00    | 29/05/2016 | 08:20:00   | 30/05/2016 | 06:30:00 | 22:10:00 |
| 24/05/2016 | 15:00:00 | 24/05/2016 | 21:40:00 | 6:40:00   | 02/06/2016 | 14:50:00 | 02/06/2016 | 19:00:00 | 4:10:00    | 12/08/2016 | 19:20:00   | 12/08/2016 | 21:50:00 | 2:30:00    | 02/06/2016 | 22:30:00   | 03/06/2016 | 05:30:00 | 7:00:00  |
| 24/05/2016 | 22:20:00 | 25/05/2016 | 19:50:00 | 21:30:00  | 02/06/2016 | 22:40:00 | 03/06/2016 | 03:10:00 | 4:30:00    | 13/08/2016 | 23:30:00   | 13/08/2016 | 01:10:00 | 1:40:00    | 03/06/2016 | 22:00:00   | 04/06/2016 | 15:50:00 | 17:50:00 |
| 25/05/2016 | 21:50:00 | 26/05/2016 | 02:00:00 | 4:10:00   | 03/06/2016 | 11:10:00 | 03/06/2016 | 14:10:00 | 3:00:00    | 13/08/2016 | 19:30:00   | 14/08/2016 | 03:30:00 | 8:00:00    | 14/06/2016 | 17:10:00   | 14/06/2016 | 18:00:00 | 0:50:00  |
| 26/05/2016 | 03:30:00 | 26/05/2016 | 18:10:00 | 14:40:00  | 04/06/2016 | 08:50:00 | 04/06/2016 | 19:30:00 | 10:40:00   | 14/08/2016 | 08:10:00   | 14/08/2016 | 23:00:00 | 14:50:00   | 17/06/2016 | 17:20:00   | 17/06/2016 | 17:50:00 | 0:30:00  |
| 27/05/2016 | 00:40:00 | 27/05/2016 | 20:40:00 | 20:00:00  | 05/06/2016 | 06:10:00 | 05/06/2016 | 11:20:00 | 5:10:00    | 15/08/2016 | 15:20:00   | 15/08/2016 | 17:50:00 | 2:30:00    | 18/06/2016 | 05:50:00   | 18/06/2016 | 06:30:00 | 0:40:00  |
| 28/05/2016 | 06:30:00 | 28/05/2016 | 22:40:00 | 16:10:00  | 14/06/2016 | 18:00:00 | 14/06/2016 | 23:00:00 | 5:00:00    | 16/08/2016 | 10:30:00   | 16/08/2016 | 11:50:00 | 1:20:00    | 18/06/2016 | 10:40:00   | 18/06/2016 | 21:00:00 | 10:20:00 |
| 29/05/2016 | 02:10:00 | 29/05/2016 | 11:30:00 | 9:20:00   | 16/06/2016 | 23:50:00 | 17/06/2016 | 08:20:00 | 8:30:00    | 16/08/2016 | 12:00:00   | 16/08/2016 | 15:20:00 | 3:20:00    | 24/06/2016 | 09:50:00   | 24/06/2016 | 12:50:00 | 3:00:00  |
| 29/05/2016 | 14:30:00 | 31/05/2016 | 02:30:00 | 36:00:00  | 17/06/2016 | 10:30:00 | 17/06/2016 | 18:00:00 | 7:30:00    | 16/08/2016 | 16:20:00   | 16/08/2016 | 18:00:00 | 1:40:00    | 24/06/2016 | 14:00:00   | 24/06/2016 | 15:00:00 | 1:00:00  |
| 31/05/2016 | 09:30:00 | 31/05/2016 | 10:40:00 | 1:10:00   | 17/06/2016 | 19:10:00 | 17/06/2016 | 20:30:00 | 1:20:00    | 16/08/2016 | 21:50:00   | 17/08/2016 | 05:00:00 | 7:10:00    | 24/06/2016 | 15:10:00   | 24/06/2016 | 16:30:00 | 1:20:00  |
| 31/05/2016 | 15:50:00 | 31/05/2016 | 18:50:00 | 3:00:00   | 18/06/2016 | 02:30:00 | 18/06/2016 | 06:50:00 | 4:20:00    | 19/08/2016 | 18:20:00   | 19/08/2016 | 21:50:00 | 3:30:00    | 24/06/2016 | 17:10:00   | 24/06/2016 | 19:00:00 | 1:50:00  |
| 31/05/2016 | 20:20:00 | 31/05/2016 | 21:40:00 | 1:20:00   | 18/06/2016 | 07:00:00 | 18/06/2016 | 09:30:00 | 2:30:00    | 20/08/2016 | 04:10:00   | 20/08/2016 | 11:10:00 | 7:00:00    | 27/06/2016 | 16:20:00   | 27/06/2016 | 20:30:00 | 4:10:00  |
| 31/05/2016 | 21:50:00 | 31/05/2016 | 23:40:00 | 1:50:00   | 19/06/2016 | 00:00:00 | 19/06/2016 | 04:10:00 | 4:10:00    | 20/08/2016 | 13:10:00   | 20/08/2016 | 14:40:00 | 1:30:00    | 27/06/2016 | 21:30:00   | 28/06/2016 | 04:10:00 | 6:40:00  |
| 01/06/2016 | 00:50:00 | 01/06/2016 | 11:10:00 | 10:20:00  | 21/06/2016 | 15:50:00 | 21/06/2016 | 18:20:00 | 2:30:00    | 20/08/2016 | 15:00:00   | 20/08/2016 | 17:00:00 | 2:00:00    | 28/06/2016 | 05:30:00   | 28/06/2016 | 08:50:00 | 3:20:00  |
| 01/06/2016 | 12:20:00 | 02/06/2016 | 09:50:00 | 21:30:00  | 24/06/2016 | 12:50:00 | 24/06/2016 | 17:40:00 | 4:50:00    | 20/08/2016 | 18:30:00   | 20/08/2016 | 20:50:00 | 2:20:00    | 28/06/2016 | 09:00:00   | 28/06/2016 | 09:10:00 | 0:10:00  |
| 02/06/2016 | 13:10:00 | 02/06/2016 | 14:50:00 | 1:40:00   | 25/06/2016 | 05:40:00 | 25/06/2016 | 18:20:00 | 12:40:00   | 21/08/2016 | 05:20:00   | 21/08/2016 | 06:50:00 | 1:30:00    | 28/06/2016 | 14:30:00   | 28/06/2016 | 16:10:00 | 1:40:00  |
| 02/06/2016 | 23:50:00 | 07/06/2016 | 07:30:00 | 103:40:00 | 26/06/2016 | 08:50:00 | 26/06/2016 | 11:20:00 | 3:20:00    | 21/08/2016 | 10:50:00   | 21/08/2016 | 12:00:00 | 1:10:00    | 05/07/2016 | 06:00:00   | 05/07/2016 | 06:40:00 | 0:40:00  |
| 07/06/2016 | 11:40:00 | 08/06/2016 | 18:20:00 | 30:40:00  | 27/06/2016 | 20:20:00 | 27/06/2016 | 21:50:00 | 1:30:00    | 21/08/2016 | 12:30:00   | 21/08/2016 | 13:10:00 | 0:40:00    | 06/07/2016 | 15:50:00   | 06/07/2016 | 16:50:00 | 1:00:00  |
| 09/06/2016 | 06:10:00 | 10/06/2016 | 07:00:00 | 24:50:00  | 27/06/2016 | 22:00:00 | 27/06/2016 | 23:00:00 | 1:00:00    | 21/08/2016 | 14:20:00   | 22/08/2016 | 10:00:00 | 19:40:00   | 06/07/2016 | 23:10:00   | 07/07/2016 | 00:20:00 | 1:10:00  |
| 10/06/2016 | 12:00:00 | 10/06/2016 | 21:40:00 | 9:40:00   | 28/06/2016 | 04:10:00 | 28/06/2016 | 05:40:00 | 1:30:00    | 22/08/2016 | 10:50:00   | 22/08/2016 | 11:00:00 | 0:10:00    | 07/07/2016 | 05:20:00   | 07/07/2016 | 06:50:00 | 1:30:00  |
| 11/06/2016 | 04:30:00 | 12/06/2016 | 06:50:00 | 26:20:00  | 28/06/2016 | 06:10:00 | 28/06/2016 | 20:00:00 | 13:50:00   | 23/08/2016 | 13:20:00   | 23/08/2016 | 19:40:00 | 6:20:00    | 07/07/2016 | 07:40:00   | 07/07/2016 | 09:20:00 | 1:40:00  |
| 12/06/2016 | 16:30:00 | 13/06/2016 | 22:50:00 | 30:20:00  | 02/07/2016 | 05:10:00 | 02/07/2016 | 17:20:00 | 12:10:00   | 23/08/2016 | 22:50:00   | 24/08/2016 | 05:00:00 | 6:10:00    | 07/07/2016 | 11:30:00   | 07/07/2016 | 12:30:00 | 1:00:00  |
| 14/06/2016 | 11:20:00 | 16/06/2016 | 19:40:00 | 56:20:00  | 03/07/2016 | 02:20:00 | 03/07/     |          |            |            |            |            |          |            |            |            |            |          |          |

