

PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE ÁGUA E ÓLEO UTILIZANDO TÉCNICAS DE ALTA TENSÃO CHAVEADA

Filipe O. Quintaes¹, Andrés O. Salazar², André L. Maitelli³, Jean Paiva⁴, Manuelle M. S. de Araújo⁵, Afonso A. D. Neto⁶

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caixa Postal 1524 - Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59072-970 Natal - RN – Brasil.

¹ filipe@dca.ufrn.br, ² andres@dca.ufrn.br, ³ maitelli@dca.ufrn.br, ⁴ paiva@dca.ufrn.br, ⁵ manuelle@eq.ufrn.br, ⁶ afonso@eq.ufrn.br.

Resumo – Este artigo apresenta o projeto de uma fonte de alta tensão e também de um circuito de chaveamento para ser utilizado em um laboratório de engenharia química para o estudo da separação de água em petróleo. São várias as razões para a remoção de todos os contaminantes presentes no óleo cru. Além dos problemas operacionais provocados durante o refino, não há interesse em se transportá-los com o cru, pois esta carga extra não só sobrecarrega o sistema de bombeamento e oleodutos, como também pode provocar erosão e corrosão destes sistemas. O objetivo da planta proposta é avaliar como cada variável envolvida no processo irá contribuir para a separação. Dentre as variáveis controláveis pode-se citar: temperatura, utilização de tensoativos, espaçamento do eletrodo, diâmetro do eletrodo, tensão, frequência e BS&W da emulsão. Partindo disso, o circuito foi simulado, projetado, montado e testado. Os testes elétricos revelaram resultados satisfatórios comparados com as simulações e dentro das especificações requeridas. Os resultados do sistema de separação (Célula Eletrostática + Fonte de Alta Tensão Chaveada) em conjunto com a microemulsão aquecida apresentaram resultados excelentes, pois ocorreu toda a separação da água presente no óleo.

Palavras-Chave: Alta Tensão; Separação; Petróleo; BSW, Desidratação Eletrostática.

Abstract – This paper presents the design of a high-voltage power supply and also a switching circuit to be used in a engineer chemical laboratory for study of the separation of water in a oil emulsions. The percentage of water in these emulsions has significant influence in tests carried in this field. There are several other reasons for the remotion of all inadequate substances present in the oil. Besides the operational problems caused during the refinement process, there is no interest to transport it with the oil, therefore an extra water produces an overload in the bomber system and pipelines, as also the water could cause a erosion and corrosion on those systems. The objective of the proposal plant is evaluate how each involved variable in the process will contribute in the separation. About the control variables can be cite: temperature, surfactants, electrod gap, electrod diamater, voltage, frequency and the BS&W of the fluid. In function of this, the circuit was simulated, projected, mounted and tested. The electronic tests revealed good results compared with the simulations and the requested specifications. The results of the separate system (Eletrostatic Cell + High-Voltage Power Supply + Switching Circuit) together with the heated microemulsion showed an excellent results, therefore all the present water was separated from the oil.

Keywords: High-Voltage, separation, petroleum, BSW, electrostatic dehydration.

1. Introdução

O interesse pela separação água-petróleo teve início por volta de 1850. O objetivo na época era a recuperação do sal, presente na água, e não do petróleo [1]. Com o advento da indústria de petróleo, em 1865, a salmoura tornou-se o contaminante e o petróleo o produto. Muitos autores estudaram diferentes processos de quebra das emulsões de petróleo do tipo água em óleo, seja por adição de tensoativos, polímeros, microemulsões, entre outros.

A introdução dos coalescedores elétricos como método de separação ocorreu por volta de 1910. Em 1911, a patente do processo de separação elétrica pertencia a Frederik G. Cotrell.

Os estudos de Cotrell (1911), foram iniciados com o uso de corrente contínua (CC) que provou ser eficiente para a desidratação de derivados de petróleo. Posteriormente, Cotrell empregou um sistema misto que utilizava tanto corrente contínua (CC) como alternada (AC); este sistema revelou-se consideravelmente melhor do que o processo anterior (CC), na desidratação de petróleo. Finalmente, Cotrell estudou o processo de desidratação de petróleo utilizando, exclusivamente, corrente alternada (AC) e concluiu ser este processo o mais aconselhável, pois, além de ser extremamente eficiente era o que representava os menores custos de instalação e operação, porem chega a apresentar no final do processo de tratamento do óleo um BSW de até 1% [2]. Onde o BSW (Basic Sediments and Water) e está descrito na Equação 1. A indústria do petróleo utiliza atualmente o sistema de desidratação com corrente alternada (AC) durante o processo de tratamento do óleo.

$$BS \& W = \frac{\text{Vazão de (Água + Sedimentos)}}{\text{Vazão de Água} + \text{Vazão de Óleo} + \text{Sedimentos}} \quad (1)$$

O processo de separação eletrostática aplica-se à separação de um líquido condutor disperso em um meio não condutor.

Quando um campo elétrico é aplicado sobre uma emulsão de água em óleo, as gotículas de água se polarizam e tendem a passar da forma esférica para a forma elíptica com o aumento do campo aplicado, conforme mostrado na Figura 1.

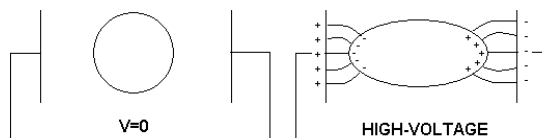


Figura 1. Distorções da gotícula em um campo elétrico.

Uma vez polarizadas as gotículas tenderão a alinhar-se com as linhas de força do campo elétrico e surgirão então as interações entre as gotículas [1], que pode provocar a coalescência. Quando as gotículas são atraídas pelos eletrodos ocorre o coalescimento por eletroforese, que é comum para o sistema com tensão contínua. A velocidade eletroforética (m/s) foi expressa por Erberz & Waterman como mostrado na Equação 2.

$$V_{ef} = \frac{Kg \cdot E^2 \cdot Rg}{\eta_c} \quad (2)$$

Onde, Kg é uma constante proporcional a carga da gota; E = Intensidade de campo (V/m); Rg = Raio da gota (m); η_c = Viscosidade da fase contínua (Pa.s).

Com o chaveamento da fonte de alta tensão contínua as gotículas sofrem distorções periódicas na forma. Estas distorções agem como uma vibração, que enfraquecem a película de emulsificantes naturais, facilitando o coalescimento pela colisão entre as gotículas vizinhas.

Este artigo apresenta o projeto de uma fonte de alta tensão variável de 1KV a 20KV e também de um circuito de chaveamento com tensão máxima admitida de 7.2 KV e frequência de chaveamento variando entre 800Hz e 10KHz.

Esta fonte juntamente com seu circuito de chaveamento será utilizada em uma planta química, como mostra a Figura 2. Onde serão feitos testes laboratoriais com níveis de tensões e frequência de chaveamento variável, para que se possa analisar diversas amostras de água-óleo em diferentes pontos de operação e conseqüentemente descobrir o melhor nível de tensão e frequência para obtenção da separação otimizada.

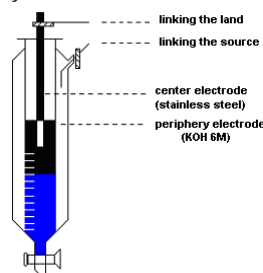


Figura 2. Planta de Separação

2. Fonte de Alta Tensão

Na nossa aplicação precisamos obter uma fonte de alta tensão variável, e como o nível de potência necessário para a aplicação é baixo em torno de 5W. É utilizado um circuito com um transformador Fly-Back. A constituição da fonte pode ser dividida como mostra o diagrama de blocos da Figura 3.

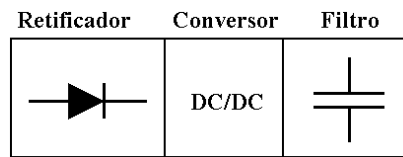


Figura 3. Diagrama de blocos da Fonte de Alta Tensão

Na etapa de retificação é utilizado um retificador (integrado da SEMIKRON) de onda completa a diodos com um capacitor de 400VDC e 1000 μ F, capacitor este responsável para evitar ripple de 60Hz na saída da fonte. A variação de tensão é obtida com um transformador variador de tensão. Na próxima etapa do projeto está previsto a variação de tensão com um retificador controlável a tiristor.

Na etapa do conversor DC-DC, existe o oscilador controlado por tensão (LM566C) responsável pela geração de onda quadrada com 3Vpp, com ciclo de trabalho de 50% e com frequência de 15KHz, que irá para a base do transistor PNP –2SC2482 FA-I como mostra a Figura 4.

Também existe nessa etapa um circuito de geração de picos de tensão e de alimentação para o primário do Transformador Fly-Back, como mostra a Figura 5.

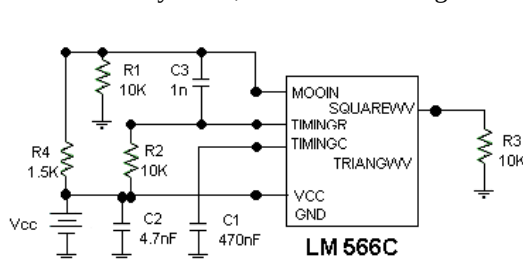


Figura 4. Circuito Oscilador da Fonte

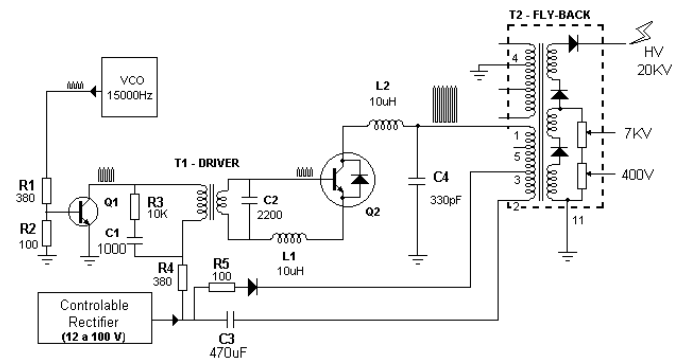


Figura 5. Circuito da fonte de Alta Tensão

O circuito oscilador utilizando o LM566C, mostrado na Figura 4, através de sua saída chaveada irá para a base do transistor Q1, onde através da saturação e do corte alternado do transistor irá gerar uma forma de onda quadrada na entrada do Transformador Drive, transformador este sendo confeccionado com núcleo de ferrite, pois para pulsos de frequências de 15KHz, apresenta uma melhor eficiência. No secundário do Transformador Drive tem o transistor Q2 (BU 2508DX), este transistor fornece energia, amplificada de acordo com a relação de espiras, ao primário do Transformador Fly-Back, no pino 1, conforme apresentado na Figura 6. Como o Transformador Drive, o Fly-Back também tem seu núcleo de ferrite. Além da entrada com os picos de tensão, existe a alimentação ac obtida com o capacitor C3 de 470nF, esta tensão também sofre a influência da regulação da tensão dc de entrada. A tensão ac irá para o pino 3, conforme Figura 5. Também existe a alimentação dc, que como a ac sofre a influência da regulação da tensão dc de entrada e irá para o pino 2 do primário do Transformador Fly-Back como mostra a Figura 5.

O Transformador Fly-Back utilizado foi o modelo 4048 da SEMP TOSHIBA. No secundário do Transformador Fly-Back existe duas unidades a primeira responsável pela geração de tensão de até 7KV, este enrolamento não será utilizado na fonte apenas será efetuado o aterramento do pino 4 e isolado os outros terminais. A outra unidade é constituída de indutores e diodos de alta tensão e representa o circuito dobrador de tensão, sendo o responsável pela geração da alta tensão de saída do transformador.

Na saída do Transformador Fly-Back há uma forma de onda de tensão pulsante com picos de alta tensão em 15KHz. Como o objetivo é obter uma fonte dc constate foi projetado um filtro capacitivo para assegurar um nível dc constante, isto é diminuindo o ripple dos picos de alta tensão de 15KHz. O circuito deste filtro é constituído de oito capacitores ligados em série de 4.7nF e 3KV. O filtro é ligado em paralelo na saída do Transformador Fly-Back, permitindo assim filtragem de tensão de até 24KV, ficando dentro dos requisitos do projeto, que é de 20KV.

3. Circuito de Chaveamento da Fonte de Alta Tensão

De acordo com o outro requisito, do projeto, que é a obtenção de frequência ajustável entre 1Khz e 10Khz e com capacidade de chavear um nível dc de 6KV. Foi projetado o circuito de chaveamento e dividido em três etapas, como mostra o diagrama de blocos da Figura 6.

Na etapa de controle de frequência existe o circuito de variação de frequência responsável pelo chaveamento da fonte. Foi dimensionado um circuito oscilador com frequência variável como mostra a Figura 7.



Figura 6. Diagrama de blocos do Circuito de Chaveamento

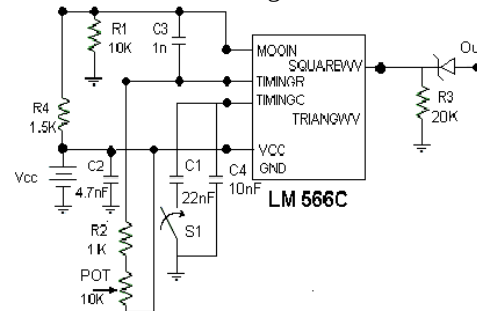


Figura 7. Circuito de Controle de Frequência

Também como na fonte, nesta etapa foi utilizado um LM556 responsável pela geração de onda quadrada que irá para a entrada do opto-acoplador. Os componentes foram dimensionados de acordo com as recomendações do datasheet do fabricante. Obtendo assim um potenciômetro de 10k Ω , para o ajuste manual da frequência. No pino 7 há a necessidade de dois capacitores, pois o circuito oscilador foi ajustado para obedecer o range de frequência do requisito do projeto.

Quando a chave S1 está aberta apenas o capacitor C4 de 10nF fica ligado no pino 7 e isto oferece um range de variação média de frequência de 2537Hz à 9672Hz. Já quando a chave está fechada, no pino 7 fica ligado os capacitores C1 e C4 em paralelo e possibilitando um range de frequência de 780Hz à 2953Hz. O circuito foi simulado no software PSPICE, montado e depois testado. A primeira versão do protótipo é constituída de um indicador manual de frequência, um LED para indicação da condição da chave S1 e uma saída contendo os terminais da saída do oscilador para uma monitoração de frequência mais exata através do osciloscópio. Para uma etapa futura, está prevista a utilização de um microcontrolador, substituindo este circuito oscilador do projeto como também a inclusão de um display para uma monitoração ajustada.

Na etapa de isolamento foi dimensionado o opto-acoplador, responsável pela proteção do circuito de controle de frequência como também oferecer proteção ao usuário. Para o dimensionamento foram observando os níveis de potência, critérios de tempos de chaveamento e quanto ao nível de isolamento.

Para a frequência de 10KHz há a necessidade de um tempo de desligamento rápido, pois deve haver um intervalo entre o tempo de descida e o tempo de subida na forma de onda de tensão x tempo, pois o não cumprimento deste requisito acarreta no não funcionamento adequado do chaveamento. O opto-acoplador tem um detector de alta velocidade onde na entrada consta de um diodo emissor de infravermelho e na saída um receptor disparador Schmitt Trigger, que fornece a histerese para a imunidade de ruído e sendo bastante rápida. O opto-acoplador dimensionado é o H11N1 da FAIRCHILD SEMICONDUCTOR.

A última etapa é a escolha e o dimensionamento da chave. Como a frequência de chaveamento máxima é de 10KHz foi escolhido o IGBT - INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR além de possuir um fácil acionamento. Para o dimensionamento do IGBT foi analisada a queda de tensão máxima entre coletor e emissor quando a chave está na condição aberta, desta forma foi dimensionado o IGBT modelo GT8Q101 da TOSHIBA possuindo um Vce máximo de 1200V e corrente de 8A. A topologia de chaveamento e de seu acoplamento é mostrada na Figura 8.

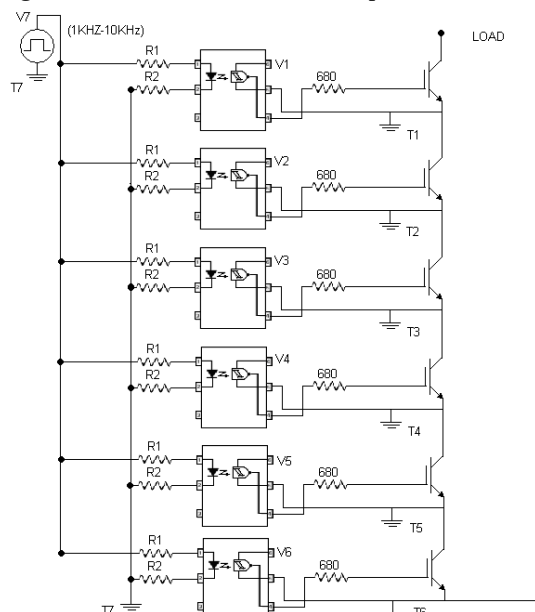


Figura 8. Circuito de Chaveamento da Fonte de Alta Tensão.

De acordo com a Figura 8, observa-se um circuito independente de acionamento dos IGBT's, isto é cada sinal de disparo tem o seu terra de referência, conseguindo assim a sua isolamento. As fontes independentes possuem níveis de tensão de 15V. Os acopladores ópticos são ligados em paralelo para obter o sincronismo do acionamento.

Já os IGBTs são ligados em série para ser conseguido o nível de chaveamento desejado. Como cada IGBT tem um V_{ce} de 1200V foi utilizado 6 unidades, oferecendo um nível máximo de chaveamento de 7200V e ficando com uma margem de segurança.

Para aplicações de alta tensão, a operação da ligação em série dos IGBT's requer alguns cuidados como distribuição uniforme das tensões sobre as chaves [3 e 4]. Como existe um sincronismo dos sinais de acionamento dos IGBT's, o nível de corrente dos IGBT's são de 8A, isto é, bem acima da aplicação proposta e o nível de tensão sobre as chaves possuem uma margem de segurança, não foi adicionado nenhum circuito de controle para distribuição das tensões sobre os IGBT's.

O circuito de chaveamento foi simulado no software PSPICE e Circuit Maker para verificar as formas de onda de saída para diversos valores de corrente de carga e frequência de operação.

4. Resultados

Depois do projeto físico e das simulações utilizando os softwares Circuit Maker e PSPICE, o circuito de chaveamento foi montado em placa de circuito impresso e foram feitos os primeiros testes. Nos primeiros testes foi utilizada uma fonte dc de baixa tensão com uma carga resistiva de 1200Ω. Os resultados destes testes são apresentados nas Figuras 10 e 11. Também através de divisores de tensão resistivos a fonte de alta tensão foi testada, como mostra Figura 12.

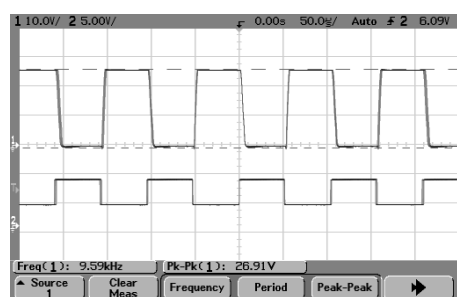


Figura 10. Forma de onda de saída para 9.59 KHz

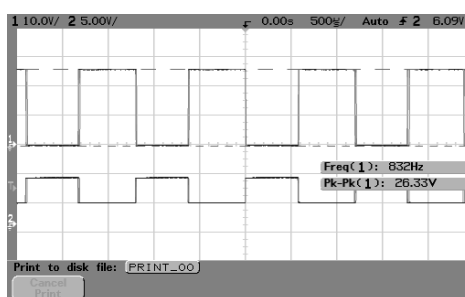


Figura 11. Forma de onda de saída para 832 Hz

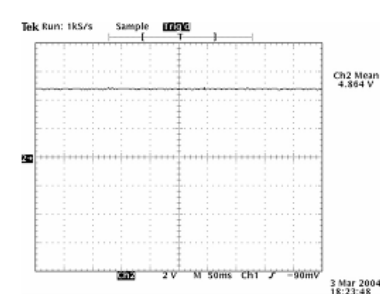


Figura 12. Forma de onda de saída da Fonte de Alta Tensão

Para a aplicação junto com a célula eletrostática foram realizados alguns testes. [5]. No primeiro teste, foi utilizada a célula aquecida na temperatura de 70°C, com tensão contínua de 4600 V, frequência de 830 Hz e volume de emulsão igual a 70mL. O intervalo de tempo do experimento foi de 53 minutos. Os resultados obtidos para a variável de resposta, corrente elétrica, podem ser observados na Tabela 2. Em relação à outra, principal, variável de resposta do tratamento eletrostático que é o volume de água separado do petróleo, não foi obtido resultado satisfatório para as condições aplicadas anteriormente, pois somente ocorreu a formação de gotas de água que puderam ser visualizadas através da parede da célula, mas não houve coalescência destas gotas e, portanto, não foi observada uma separação nítida da água do petróleo.

Para o segundo teste foi adicionado à emulsão um tensoativo comercial denominado “DGP23RC”, o álcool isopropílico como cotensoativo, a água destilada como fase aquosa, o tolueno como fase oleosa com uma relação Cotensoativo/Tensoativo = 9, pois foi a que apresentou o melhor resultado, e aplicada à mesma tensão e frequência do primeiro teste. Foi utilizado um volume de 70mL de emulsão e 2,5 de microemulsão. O intervalo de tempo do experimento foi de 30 minutos. Os resultados obtidos para as variáveis de resposta: corrente elétrica e volume de água separado do petróleo são encontrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2. Primeiro Teste

Corrente x Tempo de Teste	
Tempo (s)	Corrente (μA)
0	0,193
600	0,234
1200	0,252
1800	0,130
2400	0,132
3000	0,129

Tabela 3. Segundo Teste

Corrente x Tempo de Teste	
Tempo (s)	Corrente (μA)
0	0,300
600	0,304
1200	0,262
1800	0,130

Tabela 4. Eficiência da Separação do segundo teste

Célula + Microemulsão	
BSW _i (%)	19,00
BSW _f (%)	0,00
Eficiência da Separação (%)	100,00

De acordo com a Tabela 4, foi verificada que a aplicação conjunta da célula eletrostática e com a microemulsão é bastante eficiente na separação de água e óleo já que foi obtido um percentual de separação de 100%.

A eficiência da separação é calculada como mostrado na Equação 3.

$$\eta_{separação}(\%) = 100 - \left(\frac{BSW_f \cdot 100}{BSW_i} \right)$$

Onde:

$\eta_{separação}$ = Eficiência da separação(%)

BSW_i = BSW inicial da emulsão(%)

BSW_f = BSW final da emulsão(%)

(3)

Outros ensaios foram feitos para verificar o efeito da temperatura e de alguns tensoativos comerciais, utilizados na indústria do petróleo para a quebra da emulsão de petróleo. E também para verificar a eficiência de cada método independente a fim de comprovar a viabilidade técnica dos resultados utilizando a célula eletrostática. E os resultados são mostrados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Efeito da Temperatura

	Temperatura (°C)				
	30	50	60	70	80
BSWi (%)	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
BSWf (%)	18,57	18,5	18,00	17,14	16,21
Eficiência da Separação(%)	2,26	2,63	5,26	9,77	14,66

Tabela 6. Efeito dos Tensoativos (T=70°C)

	Tensoativos			
	DGP07	DGP23RC	DNP205	DHP40/ DWP201
BSWi (%)	19,00	19,00	19,00	19,00
BSWf (%)	0,8	0,4	0,8	19,00
Eficiência da Separação(%)	95,79	97,89	95,79	0,00

Como visto na Tabela 5, o aumento da temperatura provoca diversas mudanças nas propriedades dos fluidos como a viscosidade, tensão interfacial, e causa mudanças na estabilidade das emulsões podendo quebrá-las. Um aumento da temperatura diminui a viscosidade do meio, aumentando o número de colisões e, conseqüentemente, provocando a coalescência das gotas de água contidas no petróleo. Logo as temperaturas de 70°C e 80°C foram as que proporcionaram a maior separação.

O tempo do ensaio para a eficiência da temperatura foi de 12 horas e as determinações dos BSW's, foram obtidas conforme a Norma ABNT NBR 14647.

Em relação a Tabela 6, o tensoativo DNP205 não levou a separação durante os 30 minutos do banho termostático na temperatura de 70°C, somente separou a água quando foi retirado do banho, ou seja durante o tempo em que ficou resfriando na temperatura ambiente. Observa-se também que os tensoativos DGP23RC e DGP07 são os mais eficientes e os tensoativos DHP40 e DWP201 não promoveram a separação.

6. Conclusão

Existem várias variáveis envolvidas no processo de separação de água e óleo, com a utilização desta fonte de alimentação e do circuito de chaveamento em conjunto com a célula eletrostática é possível identificar e quantificar individualmente o efeito de algumas destas variáveis envolvidas, como: a tensão entre os eletrodos, espaçamento entre os eletrodos, temperatura de tratamento, frequência de chaveamento, diâmetro do eletrodo, o uso do tensoativo e a variação da razão C/T (cotensoativo/tensoativo).

A fonte foi projetada para a aplicação em conjunto com a célula eletrostática e por isso apresenta limites relacionados ao volume de separação e a potência da fonte de alimentação.

Ainda é cedo para tirar conclusões mais sólidas sobre a eficiência do sistema de separação com a célula eletrostática, pois o ensaio realizado foi específico para um tipo de óleo. Mas, como visto nos resultados, o sistema de separação em conjunto com a microemulsão aquecido a uma temperatura de 70°C apresentou resultados excelentes, pois ocorreu toda a separação da água presente no óleo.

7. Referências

- [1] OLIVEIRA, R. C. G.; FIGUEIREDO, A. M. P. Estado da arte sobre o processo de tratamento eletrostático de emulsão de petróleo e derivados. Rio de Janeiro: PETROBRAS, CENPES, DIPLOT, 1989. 107f. (Relatório DIPLOT 674-12978).
- [2] THOMAS, JOSÉ EDUARDO. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, PETROBRAS, 2001.
- [3] BAEK, J. W.; KIM, H. AND YOO D. W., High-Voltage Switch Using Series-Connected IGBTs With Simple Auxiliary Circuit. IEEE Transactions on Industry Applications, V. 37, NO.6, NOVEMBER/DECEMBER 2001.
- [4] GERSTER, C., FAST High-power/High-voltage Switch Using Series-connected IGBTs with Active Gate-controlled Voltage-balancing. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland.
- [5] ARAÚJO, M. M. S. Estudo da Quebra de Emulsões de petróleo Utilizando Microemulsões e Célula de Desidratação Eletrostática. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Setembro 2004.
- [6] BRASIL, N. Í., Tratamento de Petróleo Desidratação/ Dessalgação. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 5ª Revisão março 2002.