MONTAGEM DE SISTEMA DE DESTILAÇÃO COM CONTROLE DE TEMPERATURA UTILIZANDO COMO FONTE DE ALIMENTAÇÃO CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Graciela Palma Gomes Barboza – graciela_barboza@yahoo.com.br
Jéssica Fernandes dos Santos – jessika_fsantos@hotmail.com
Jossenice Vieira dos Santos – jossenice@hotmail.com
Lilian Falcão Coelho de Jesus– liu_fcj@hotmail.com
Scarlet Lara da Silva Guedes– scarlettguedes@gmail.com
UNIFACS, Departamento de Engenharia e Arquitetura
Av. Cardeal da Silva, 132, Federação.
40220141 – Salvador – Bahia

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo apresentar os estudos e procedimentos realizados para a montagem de uma torre de destilação que utiliza como fonte de alimentação elétrica para o sistema de controle de temperatura, as células fotovoltaicas sensibilizadas com corante natural, possibilitando a utilização destas células na indústria petroquímica e outras plantas industriais. A crescente demanda por fontes alternativas de energia, conciliado com a necessidade de minimização dos custos motivou a realização deste projeto, permitindo a integração com as Engenharias, elétrica, química e de automação. Para tal, realizou-se a montagem de um sistema de controle de temperatura para uma torre de destilação, onde o circuito é alimentado por células fotovoltaicas. No processo de destilação foi possível separar uma mistura equimássica de água e álcool, e obter 90,0 %massa de etanol no topo da torre. O material semicondutor empregado na base da célula foi o dióxido de titânio, devido ao menor custo e ser mais acessível que o silício; o corante escolhido para sensibilização foi a pimenta habanero, pois através de ensaios realizados, este corante apresentou maiores rendimentos e estabilidade. Em virtude do projeto exposto, é possível restringir o número de instrumentos de medição ligados ao sistema de no-break das plantas industriais, diminuir a vulnerabilidade das plantas, em caso de interrupção no fornecimento de energia elétrica proveniente das fontes convencionais e promover uma atuação com foco na sustentabilidade.*

Palavras-chave: *automação, células fotovoltaicas, engenharia, sustentabilidade, torre de destilação.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à preocupação com a limitação dos recursos naturais e à crescente necessidade energética dos países em desenvolvimento, as fontes alternativas de energia são cada vez mais requisitadas. Dentre essas fontes, a energia solar destaca-se devido sua disponibilidade; novas tecnologias estão sendo estudadas para exploração e melhor aproveitamento da luz solar.

Utilizou-se no projeto para conversão da luz solar a célula de Grätzel, célula solar fotoquímica ou ainda célula solar nanocristalina sensibilizada por corante (CSNS) (AGNALDO *et a*l., 2006). O funcionamento dessa célula é fundamentado no efeito fotovoltaico utilizando-se materiais semicondutores, nos quais a diferença de energia entre as bandas de valência e a banda de condução é pequena. A temperatura ambiente, alguns elétrons podem ser termicamente excitados da banda de valência para a banda de condução podendo nessa condição, o material conduzir eletricidade (LEE, 1999). O material utilizado na fabricação da célula foi o dióxido de titânio (TiO_2) por apresentar menor custo e maior disponibilidade que o silício.

Nos experimentos realizados durante o projeto, foi constatado que dentre os corantes testados: alaranjado de metila, repolho roxo, soja preta e pimenta, este último obteve os melhores resultados para a célula fotovoltaica, levando-se em consideração não apenas o rendimento, mas também a facilidade no controle do pH, os custos envolvidos, e o mais importante: a sua estabilidade.

A implementação da célula fotovoltaica na indústria visando à redução do consumo de energia elétrica, a partir de fontes não renováveis, é estudada nesse projeto através da alimentação de um sistema de controle de temperatura em uma torre de destilação que separa uma mistura equimássica de água e álcool etílico. A célula fornece a energia elétrica necessária para a operação do sistema de controle de temperatura, através do qual é possível monitorar esta variável no topo da torre, e devido à lógica de automação determinada, finaliza-se o processo de destilação quando a temperatura atingir 83,0 °C. A utilização das células fotovoltaicas nos instrumentos de controle dos equipamentos das plantas industriais possibilita a redução do número de instrumentos de medição ligados ao sistema vital de alimentação elétrica das plantas industriais e a diminuição da vulnerabilidade em caso de interrupção no fornecimento de energia elétrica proveniente das fontes convencionais.

A construção do projeto viabilizou o trabalho com os alguns campos da Engenharia, envolvendo a Engenharia Elétrica e de Automação na construção do sistema de controle de temperatura, Engenharia Química nos cálculos das dimensões necessárias para a montagem da torre de destilação e a separação da mistura de água e álcool com boa eficiência e na confecção da célula fotovoltaica com a coautoria da Engenharia Elétrica, permitindo a equipe uma ampla visão da realidade e necessidade de se trabalhar as diversas áreas no ambiente industrial.

A utilização da energia solar na indústria petroquímica oferece diversas vantagens, que abrange a redução nos custos de energia até a diminuição das grandes perdas de produção devido a interrupções no fornecimento de energia elétrica. A melhoria do sistema de automação no controle reduzirá os custos e maximizará a produção da unidade, pois evitará parada da planta em caso de *blackout*.

A coluna de destilação é um dos equipamentos de separação mais empregados na indústria química e petroquímica. O princípio é baseado na diferença entre os pontos de ebulição das substâncias envolvidas, onde o produto com maior volatilidade sai pelo topo da coluna, sendo este no projeto, o etanol, pois possui menor ponto de ebulição em relação à água. O controle de temperatura desenvolvido para este equipamento é de extrema importância, pois o fluido menos volátil não pode ser arrastado para o topo da coluna, para não ocasionar perdas na eficiência. Calor é adicionado na base da coluna por meio do *reboiler*, um refervedor que gera uma corrente interna de vapor, enquanto no topo da coluna é feito o refluxo onde o calor é retirado para condensar a corrente de vapor e gerar uma corrente interna em fase líquida garantindo uma separação de fases eficiente.

No sistema de controle utilizado, o sensor de temperatura envia a um microcontrolador valores de tensão que estão relacionados com a temperatura interna da coluna. O micro

controlador calcula o valor da temperatura com base no sinal recebido. Baseado neste valor, o sistema de controle interrompe a corrente elétrica enviada para a resistência de aquecimento do *reboiler* finalizando o processo de destilação da mistura.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A concepção do sistema de destilação da mistura equimássica de água e etanol, consiste em uma fonte de alimentação elétrica utilizando as células fotovoltaicas sensibilizadas por corante (CSNS), uma torre de destilação com enchimento de anéis de *raching* e um sistema automático de controle da temperatura no topo da torre. A seguir são apresentadas as etapas de construção de cada um dos principais elementos que constituem o sistema.

2.1. Preparação das células CSNS

As células fotovoltaicas têm a capacidade de fornecer a alimentação elétrica para o circuito do sistema de controle de temperatura da torre. Baseado no fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico, no qual uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos é observado devido à incidência de luz, este fenômeno foi primeiro relatado pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839.

As células fotovoltaicas CSNS são constituídas por um eletrodo positivo, o corante sensibilizador, o eletrólito e o eletrodo negativo. No eletrodo positivo é depositado uma camada do semicondutor (TiO_2) sobre um substrato de SnO, o qual confere a condutividade ao eletrodo. No eletrodo negativo é depositada a camada de carbono que age como catalisador. O efeito fotovoltaico nas células tipo CSNS ocorre quando a luz solar incide sobre as moléculas do corante (depositadas no eletrodo negativo), estas absorvem a radiação visível passando, assim, ao estado excitado. As moléculas excitadas do corante injetam elétrons na banda de condução (BC) do semicondutor, permanecendo em um estado oxidado. Esses elétrons são transportados para o eletrodo positivo, via circuito externo, e então, introduzidos no eletrólito, onde reagem com o par oxi-redutor (iodeto/triiodeto) e a seguir com a molécula do corante que havia sido oxidada, completando o processo regenerativo da célula. Mantendo este ciclo, a energia solar pode ser continuamente convertida em energia elétrica, enquanto a célula estiver conectada a uma carga (GRÄTZEL, 2003).

Realizado no laboratório de física do curso de Engenharia Química, o processo de produção das células seguiram as seguintes etapas:

Preparação da camada condutora: sobre as lâminas de vidro limpas e secas, foi pulverizada uma solução de 10,0 g de cloreto de estanho di-hidratado em 20,0 mL de metanol; para formação da camada transparente e condutora de dióxido de estanho, as lâminas foram aquecidas a 600,0 °C. O procedimento de pulverização e aquecimento foi repetido seis vezes em intervalos de 2 minutos para cada lâmina. O valor de resistência medido, a distância de 1,0 cm na superfície da lâmina foi de 1,0 kΩ;

Preparação do eletrodo negativo: sobre a camada condutora foi depositada manualmente, com ajuda de um bastão de vidro e em uma área delimitada (2,0 cm x 5,5 cm), a solução coloidal de 10,0 g de TiO_2, 10,0 g de etanol e 2 gotas de solução aquosa 10,0 %massa de tensoativo utilizado em laboratório. A sinterização da fina camada de TiO_2 foi realizada em uma mufla a 400,0 °C por 30 minutos.

Preparação do eletrodo positivo: sobre a superfície transparente e condutora foi depositada uma fina camada de grafite, facilmente aplicada riscando-se um lápis número 2 diretamente na superfície da lâmina. Este procedimento faz-se necessário, pois o cloreto de

estanho tem condução tipo *n* e com a junção do grafite, passa a condução tipo *p*; com isso, na montagem da célula tem-se uma junção tipo p-n.

Preparação da solução de corante e absorção pelo semicondutor: o corante orgânico foi extraído da pimenta tipo habanero (*Capsicum chinense*), utilizando-se 15,0 g da pimenta maceradas e imersas no solvente, etanol, por 24 horas. As lâminas depositadas com o TiO_2 foram imersas por 3 horas na solução para absorção do corante. Em seguida foram lavadas com água destilada e secas rapidamente com um jato de ar quente por aproximadamente 10 minutos.

Deposição do eletrólito e Montagem da célula: o eletrólito consiste em uma solução aquosa 0,5 mol/L de iodeto de potássio (KI) com 0,05 mol/L de iodo resublimado. Quatro gotas do eletrólito foram depositadas na camada de TiO_2 ativada com o corante orgânico. Para montagem da célula, realiza-se a união do eletrodo TiO_2/corante ao eletrodo de grafite. As células foram vedadas nas laterais com silicone para evitar a evaporação do eletrólito e assim garantir o funcionamento das células por longo período.

Na Figura 1, mostra-se uma das placas construídas a partir das células fotovoltaicas preparadas pelo método experimental descrito anteriormente. Foram montadas duas placas.

Figura 1 - Placa da célula fotovoltaica de pimenta.

2.2. Construção e operação da torre de destilação

No projeto da torre de destilação foram utilizados materiais de fácil obtenção e baixo custo: enchimento interno de anéis de *raching* de polietileno com 10,0 mm de diâmetro, estrutura metálica da torre, refluxo e *reboiler* em aço carbono, conexões e válvulas em aço inox, isolamento térmico de lã de rocha e revestimento térmico em alumínio corrugado. Para o aquecimento do *reboiler* foi utilizada uma resistência elétrica de kantal / 800 W de potência. As dimensões são apresentadas na figura 2.

Para as dimensões utilizadas, foi calculado o número de pratos teóricos da torre ou estágios de equilíbrio (N), a partir da Equação (1):

$$Z = HETP \cdot N \quad (1)$$

Onde: Z corresponde à altura do enchimento da coluna necessário para obter a separação equivalente para N pratos teóricos (CARLOS e LACERDA, 1988); HETP é considerado o diâmetro, quando é utilizado dimensões inferiores a 0,3 m para este parâmetro. N é um parâmetro adimensional. O número de pratos teóricos obtidos para a torre utilizada com as dimensões: 80,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro foi N =13.

O sistema de destilação utilizado neste trabalho, foi especificado para realizar a destilação fracionada de 1,0 L de uma mistura com 28 %mol/L de etanol e 72 %mol/L de água, ou seja, uma mistura equimássica destes componentes.

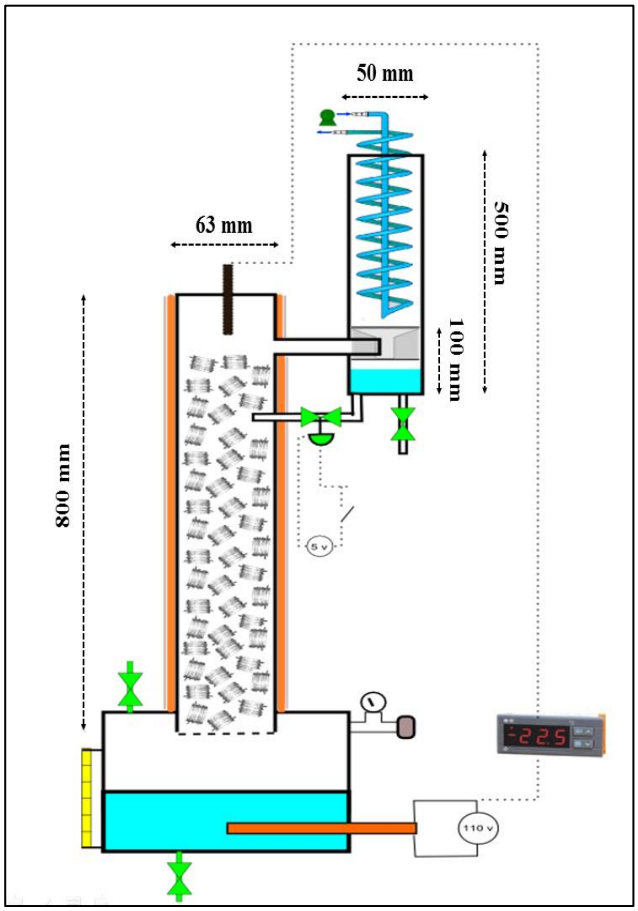

Figura 2 - Dimensões da torre de destilação.

2.3. Montagem do circuito elétrico e automação

Para o controle de temperatura da torre de destilação foi utilizado um circuito que necessita de aproximadamente de uma tensão de 5,0 V para funcionar adequadamente. As células fotovoltaicas são instaladas para fornecer a tensão necessária ao funcionamento do circuito do sistema de controle de temperatura.

O princípio do controlador utilizado é explicitado a seguir:

Um sensor é instalado no topo da coluna e em contato com o fluido ascendente da torre de destilação produz um sinal analógico que é enviado ao microcontrolador, este calcula a

temperatura correspondente do sinal emitido. Ao alcançar a temperatura de 83,0 ºC, o microcontrolador desenergiza o dispositivo de aquecimento do *reboiler* da torre, finalizando o processo de destilação. Além dessa função, o microcontrolador disponibiliza a visualização do valor medido em um visor digital.

O sensor utilizado para a medição de temperatura é um termoresitor, modelo PT 100. O microcontrolador é o dispositivo que faz os cálculos matemáticos e interpreta os sinais provindos do sensor. Uma das funções desse dispositivo é ler a tensão e transformar na resistência equivalente do termoresistor. Pelo manual do PT-100 encontra-se a equação (2) que relaciona a resistência com a temperatura (onde: A= 3,9083 x 10^{-3} ; B= -5,775 x 10^{-7}; T= temperatura em graus Celsius; R_0= 100 a temperatura em 0 °C):

$$RT = R_0(1+AT + BT^2) \quad (2)$$

para temperatura maior que 0 °C

O microcontrolador é programado para realizar esse cálculo e assim fornecer a temperatura obtida pelo termoresistor.

A temperatura que foi estabelecida para interromper o processo da torre de destilação é de 83,0 °C para o fluido ascendente. Uma chave é conectada a alimentação elétrica da fonte de calor do destilador com o objetivo de fazer a conexão com o controlador de temperatura e, assim, chavear o sistema.

Quando a temperatura atinge 83,0 °C o microcontrolador envia um sinal na entrada do circuito de controle para desligar a alimentação do aquecimento elétrico.

A descrição do circuito acima consiste no princípio de funcionamento de controladores de temperatura.

A montagem do circuito elétrico e automação proporcionaram uma excelente oportunidade para a integração da Engenharia Eletrônica, Elétrica e de Automação com a Engenharia Química na construção da torre de destilação. A criação do circuito através de programas de softwares e construção de placa eletrônica onde se pode adequar completamente o controle de temperatura ao interesse dos pesquisadores seria um projeto futuro a ser analisado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As células fotovoltaicas tipo CSNS sensibilizadas com o corante natural da pimenta habanero, *Capsicum chinense*, foram produzidas em outubro do ano de 2012. A tensão inicial fornecida pelas células na época foi de 2,3 V. Atualmente, o valor registrado é de 1,8 V.

Considerando as condições de produção e armazenamento das células, observa-se uma boa estabilidade da tensão; a queda nos valores registrados é devido a degradação do corante e eletrólito, assim como a pequenos vazamentos deste em algumas unidades das células.

Com a associação das células em série foi possível atingir a tensão necessária para energizar o circuito do controlador. A energia fornecida ao sistema de destilação para aquecimento da mistura e, assim, obtenção de 20,0 mL de etanol destilado, foi de 480 kJ. Esse valor foi calculado de acordo com a equação (3) (onde: P é igual a potência de 800 W; Δt é igual ao tempo de 600 s):

$$E = P.\ \Delta t \quad (3)$$

A análise cromatográfica realizada para avaliar a qualidade do etanol destilado apresentou o seguinte resultado: 90,0 %massa de etanol e 10,0 %massa de água (figura 3). Este resultado demonstra a eficiência do sistema utilizado para realização da destilação.

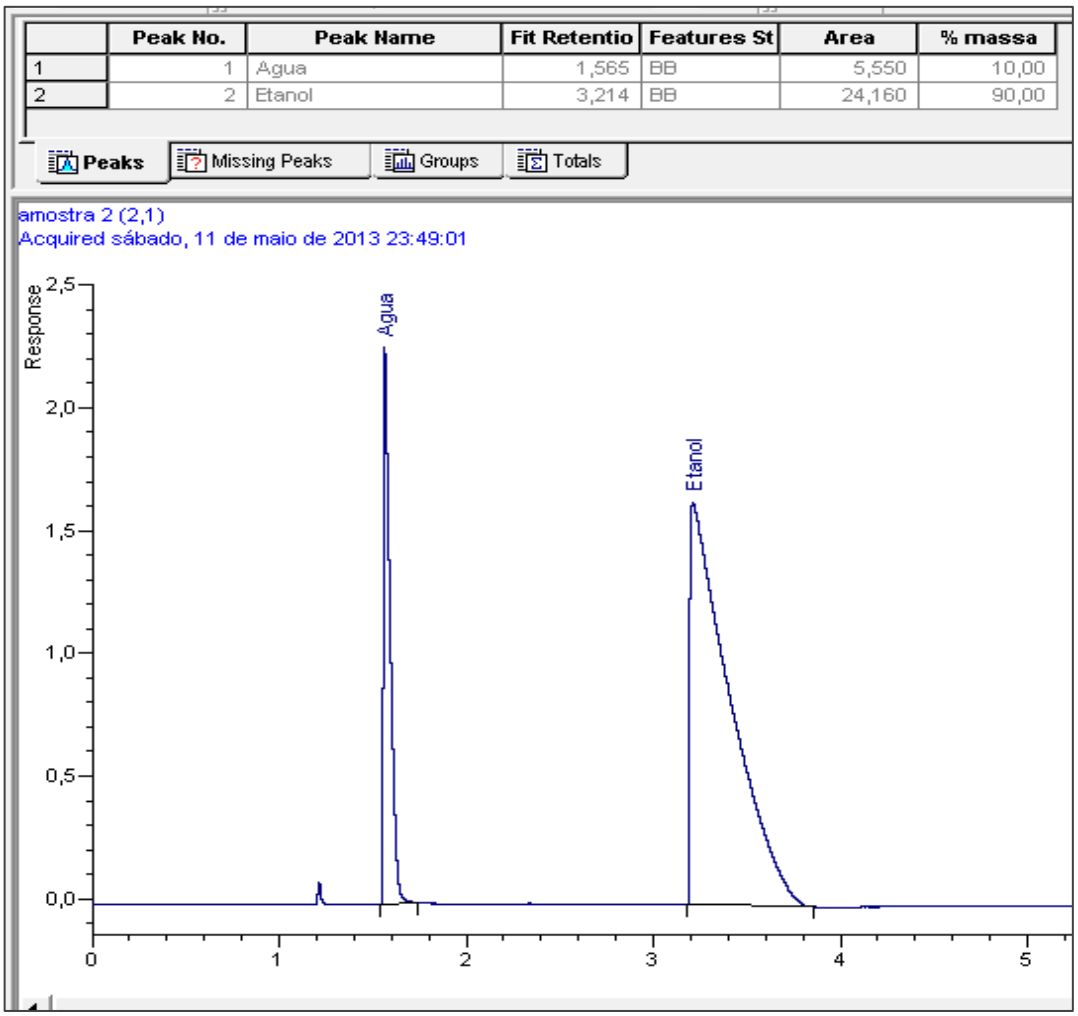

Figura 3 - Cromatograma do produto obtido após processo de destilação.

O circuito do controle de temperatura funcionou de acordo com o esperado: quando o fluido ascendente da coluna da torre de destilação atingiu a temperatura de 83,0 °C, o sistema de controle desligou automaticamente o fornecimento de energia elétrica convencional de alimentação do forno do destilador.

Na figura 4, visualiza-se a torre de destilação construída, o sistema de controle de temperatura e a célula fotovoltaica:

Figura 4 - Torre de destilação com sistema de controle de temperatura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho comprovou a viabilidade técnica da utilização de energia solar no setor industrial através de células fotovoltaicas CSNS a partir do corante natural da pimenta habanero, *Capsicum chinense*. As células forneceram a energia necessária para o circuito do sistema de controle de temperatura de uma torre de destilação funcionar adequadamente. O sistema de destilação construído para esse projeto apresentou-se satisfatório, visto que foi obtido a separação água/etanol, etanol com 90,0 %massa de pureza.

Pelos resultados obtidos, esse trabalho fornece excelente oportunidade de integração das áreas de Engenharia Química, Eletrônica e Elétrica, constituindo-se em um excelente meio para a promoção e intensificação da relação acadêmica em uma universidade ou entre universidades. Além dos conhecimentos técnicos e estudos científicos, esse projeto abre espaço para a discussão da viabilidade econômica de aplicação da energia solar no setor industrial e a promoção do desenvolvimento da produção industrial sustentável.

Agradecimentos

Agradecimentos devidos ao professor orientador Paulo Lobo, ao professor co-orientador Sérgio Borges pelas valiosas contribuições e acompanhamento durante o desenvolvimento do projeto e ao professor e Coordenador do Projeto Acadêmico Interdisciplinar da UNIFACS, Ronaldo Costa, pelo incentivo e apoio, aos técnicos: Marcos Vinício de Almeida e José

Arlindo Costa, das empresas Braskem e Serma respectivamente, que concederam suporte na confecção da torre de destilação. Ao engenheiro eletrônico Jônatas Pitanga que nos auxiliou na elaboração do sistema de controle de temperatura e automação do projeto.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, Manuel; CUNHA, Antônio; Fazer uma Célula Voltaica; Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Disponível em:<http://www.cienciaviva.pt/docs/celulafotovoltaica.pdf>. Acesso em: 20 de out. 2012.

CALDAS, J. N., DE LACERDA, A. I. Torres Recheadas, JR Editora Técnica, Rio de Janeiro, 1998.

GRÄTZEL, M. Dye-sensitized solar cells.J. Photochem. Photobiol.C: Photochem. Rev., v. 4, p.145, 2003.

J.S. AGNALDO, J.B.V. BASTOS, J.C. CRESSONI1 E G.M. VISWANATHAN; Células solares de TiO_2 sensibilizado por corante. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 1, p. 77 - 84, (2006).

LEE, J. D. Química Inorgânica não tão concisa. São Paulo: Edgard Blücher, 1999, p. 33.

MOUNTING OF A DISTILLATION SYSTEM WITH TEMPERATURE CONTROL USING PHOTOVOLTAIC CELLS AS SUPPLY.

Abstract: *This work presents the studies and procedures of building a distillation tower. Dye-sensitized photovoltaic cells are used as a source of power to the temperature control system, allowing the use of these cells in the petrochemical industry and other industrial plants. The growing demand for alternative energy sources and the need to minimize costs motivated this project, allowing integration with the Electrical, Chemical and Automation Engineering. For that purpose, a temperature control system of the distillation tower was constructed, where the circuit is powered by photovoltaic cells. It was possible to separate a mixture of ethanol in water containing 50% of ethanol weight, and it was obtained 90% of ethanol weight at the top of the tower. Titanium dioxide semiconductor was used as the material of the cell bases, due to lower cost and being more accessible than silicon semiconductor. The habanero pepper was chosen as dye because it presented higher efficiency and stability through the tests. Based on the project above, it is possible to restrict the number of measuring instruments connected to the no-break system of industrial plants, reducing the vulnerability of plants, in case of an interruption in the electricity supply from conventional sources and promote industrial activities with focus on sustainability.*

Key-words: *automation, distillation tower, engineering, photovoltaic cells, sustainability.*