



## RECURSO EDUCACIONAL PARA ENSAIO DO SISTEMA DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS MULTIRROTORES

**Resumo:** Atualmente, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) estão se popularizando em aplicações civis. A necessidade de modelos com alta performance e rendimento torna essas aeronaves objeto de estudo em grupos de pesquisa. O responsável pelo desempenho dessas aeronaves é o sistema de propulsão, composto por hélice, motor e controlador de velocidade. Esse conjunto é, ao mesmo tempo, agente motivador para o ensino/aprendizagem em disciplinas dos cursos de engenharia. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é desenvolver uma plataforma experimental, que atue como instrumento de medição e possibilite ao aluno analisar as grandezas físicas que influenciam diretamente no comportamento desses sistemas. A metodologia se desenvolve a partir do projeto e da construção de módulos de aquisição de dados. O resultado contribui com o ensino de disciplinas do curso de engenharia.

**Palavras Chaves:** Plataforma didática, Propulsor, RPA.

### 1. INTRODUÇÃO

Um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) é uma aeronave que pode ser controlada remotamente (RPA – *Remotely Piloted Aircraft*) ou voar de forma autônoma (AA – *Autonomous Aircraft*). Os RPAs são apropriados para um amplo conjunto de aplicações, tais como produção de conteúdo jornalístico, monitoramento ambiental e pesquisa acadêmica. Atualmente, destacam-se os modelos multirrotores. Esses, devido a sua popularização, são utilizados no ensino de disciplinas do curso de engenharia.

No meio acadêmico é relevante investigar o desempenho dessas aeronaves a fim de projetar modelos que atendam determinadas especificidades de voo. Faundes, N. et al. (2013), retratou o estado da arte sobre metodologias de otimização de multirrotores. Chéron, C. et al. (2010), desenvolveu um estudo com plataformas de testes para identificar a eficiência do sistema de propulsão. O propulsor é composto por motor de corrente contínua, controlador eletrônico de velocidade (ESC – *Electronic Speed Controller*) e hélice.

No entanto, uma das principais dificuldades para o aluno é retratar os fenômenos físicos que envolvem esses sistemas, haja vista que esses são de difícil observação. Isso pode acarretar em desinteresse por parte dos estudantes. Para que isso não ocorra, é necessário utilizar recursos de ensino que facilitem o aprendizado.

Nesse contexto, esse trabalho investiga a aplicação de plataformas como instrumento de ensino/aprendizado, aplicados na observação de fenômenos físicos. A confirmação dar-se-á por meio de observação, em que os resultados poderão ser comparados, posteriormente, com as relações estudadas em sala de aula. Assim, o projeto deve contribuir para o aprendizado de conceitos científicos, no meio acadêmico, sobre o desempenho dos módulos propulsores.

A composição deste artigo está organizada em 5 seções: Na seção 2 define-se conceitos sobre as grandezas físicas observáveis. A seção 3 aborda a metodologia, que evolui a partir da implementação dos módulos de medição. A seção 4 apresenta os resultados, análise e discussão. Por fim, na seção 5 é apresentada a conclusão e trabalhos futuros.

Organização



Promoção

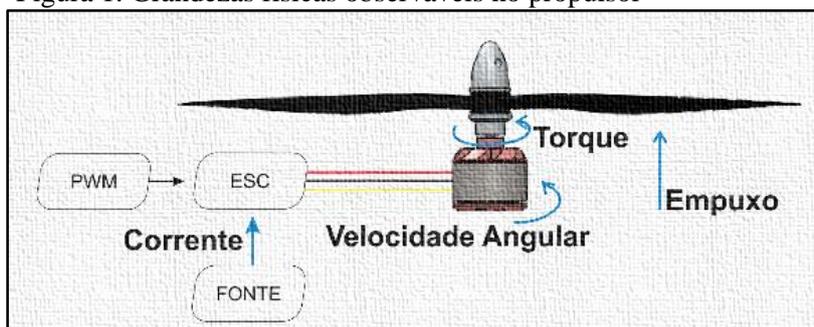




## 2 GRANDEZAS FÍSICAS

Os Veículos Aéreos Não Tripulados possuem múltiplas configurações. No entanto, independente do arranjo, o sistema de propulsão é o responsável por sua estabilidade e mobilidade. O conjunto motor-hélice realiza a conversão da energia elétrica em mecânica, na forma de empuxo (GABRIEL, 2011). A transferência de energia do módulo de propulsão é ilustrada no esquema da Figura 1. Os conceitos dessas grandezas são desenvolvidos nas disciplinas lecionadas nos cursos de engenharia.

Figura 1. Grandezas físicas observáveis no propulsor



### 2.1 Empuxo

O aluno aprende em Física que um corpo total ou parcialmente imerso em um fluido sofre ação de uma força de módulo igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Essa força é denominada empuxo, possui sentido oposto ao da gravidade, e a intensidade é igual à do peso deslocado. Usualmente, nas disciplinas de física, relaciona-se o empuxo ao líquido, porém um fluido é definido como qualquer substância que pode fluir ou escoar. Essa definição também descreve o comportamento dos gases. No caso do empuxo do sistema de propulsão, esse pode ser definido pela Equação (1).

$$E = m * g \quad (1)$$

Sendo  $m$  a massa e  $g$  a aceleração da gravidade.

### 2.2 Velocidade Angular

Também, o aluno aprende que a taxa de variação dada pela relação entre um movimento circular de uma partícula no tempo é denominada velocidade angular. Essa se define para todo ponto de um corpo rígido, que gira em torno de um eixo fixo e cujo raio é a distância do ponto ao eixo de rotação.

O aluno observa que a taxa temporal de variação do ângulo é a mesma para todas as partículas. Portanto essa pode ser definida instantaneamente como um deslocamento angular de curta duração dividido pelo tempo e definida pela Equação (2).

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$



### 2.3 Torque

É definido como a tendência do acoplamento mecânico (de uma força e sua distância radial ao eixo de rotação) para produzir rotação. Em aeronaves de asas rotativas, como é o caso de multirrotores é possível relacionar o coeficiente de torque ( $C_T$ ) ao empuxo e à velocidade angular através da Equação (3). (LEISHMAN, 2006).

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho * A * R^2 * \omega^2}\right)^3 * \frac{1}{2}} \quad (3)$$

Sendo,  $\rho$  a densidade do ar,  $A$  a área do disco e  $R$  o raio da hélice. Assim, por meio da Equação (4) se obtém o valor do torque ideal.

$$T = C_T * \rho * A * R^3 * \omega^2 \quad (4)$$

### 2.4 Corrente Elétrica

No curso de engenharia aprende-se que corrente elétrica é a taxa de fluxo de cargas, partículas chamadas íons quando positivas ou elétrons quando negativas, através da superfície de um material condutor. Sua intensidade é definida como a razão entre a quantidade de cargas pelo intervalo de tempo, expresso na Equação (5).

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5)$$

A intensidade pode ser medida por meio de amperímetro ligado em série no circuito. No caso de corrente contínua as cargas se movimentam do polo positivo para o negativo da fonte.

## 3 METODOLOGIA

A pesquisa realizada possui natureza sistemática, metódica e crítica. É quantitativo-descritiva, exploratória e experimental. Nesse emprega-se o método dedutivo, da análise geral para a particular. O estudo envolve a concepção de um recurso educacional com o intuito de observar o desempenho comportamental das grandezas que influenciam no desempenho do módulo propulsor eletromecânico. Em que, com o auxílio da plataforma, os alunos de graduação e pós-graduação poderão observar o comportamento das variáveis: empuxo ( $E$ ), velocidade angular do motor ( $\omega$ ), torque do motor ( $T$ ) e a corrente drenada pelo mesmo ( $I$ ).

A leitura dessas variáveis será realizada por sensores. Cada sensor é responsável pela medição de uma grandeza e representa um módulo de aquisição de dados. A ligação desses módulos é realizada por meio de uma plataforma eletrônica *open-source* de prototipagem (Arduino UNO). O Arduino é composto de entradas e saídas analógicas e digitais, e pode ser conectado ao computador via USB (*Universal Serial Bus*) e programado via IDE (*Integrated Development Environment*) utilizando linguagem baseada em C/C++.

O primeiro módulo efetua a medição do empuxo. A técnica utilizada é por meio de

Organização



Promoção





balança de precisão. Esses dispositivos são usados para medir o peso de um corpo, para isso utilizam células de carga, uma estrutura eletromecânica que recebe esforços e se deforma dentro do regime elástico. A célula de carga converte o valor de deformação em voltagem por meio de um circuito elétrico constituído de resistores variáveis e é considerada um transdutor, uma vez que transforma duas formas de energia, para fins de medida (WERNECK, 1996).

Ao aplicar uma força em um material e esse se deforma dentro do regime elástico, a lei que rege esse fenômeno é a Lei de *Hooke*. Desse modo, a célula de carga é composta por um elemento elástico que recebe esse esforço. Na mesma, extensômetros, conhecidos como *strain gauges*, são colados. Esses extensômetros são constituídos de uma grade de fio metálico, em que seu princípio de funcionamento é baseado nas propriedades do material e estabelece que sua resistência altera de acordo com os esforços submetidos.

Normalmente, as células de carga possuem quatro extensômetros ligados entre si e a forma como são interligados configuram o circuito Ponte de *Wheatstone*. Esse é utilizado para medir o desequilíbrio de voltagem entre dois pontos. Após análise, optou-se pela configuração denominada “ponte completa”, pois oferece maior precisão nas leituras. Quanto ao tipo de célula de carga, a estrutura que possui características que se destacam é a que utiliza viga em balanço. Nesta configuração o elemento elástico é insensível a esforços laterais e possui como característica o esforço em flexão, medindo deformações de tração e compressão.

Em seguida, para o módulo de aquisição da velocidade angular, o modo que apresenta relevância para leitura do sinal é por meio de sensor de reflexão, pois representam uma boa opção devido ao baixo custo e facilidade de encontrar no mercado. Esses dispositivos possuem acoplado no mesmo invólucro um sensor infravermelho (emissor) e um fototransistor (receptor). Como o sensor trabalha com emissão e reflexão de luz infravermelha, é necessário a utilização de faixas com intercalação de cor clara e escura. Assim, uma onda quadrada é obtida na saída do sensor. Esta onda varia linearmente com a velocidade do motor, gerando um sinal que pode ser interpretado pelo circuito gerenciador.

Posteriormente, a grandeza a ser medida é a corrente elétrica. Os motores *brushless* são trifásicos, com configuração estrela e cada fase consome 1/3 da corrente total solicitada. A potência elétrica é fornecida através de uma fonte de tensão contínua e um controlador eletrônico de velocidade. O ESC é um dispositivo microcontrolado que trabalha a partir de um sinal de referência (PWM – *Pulse Width Modulation*) e controla a comutação eletrônica variando a corrente do motor. Diante disso, o método indicado para aquisição de corrente é por meio de um sensor linear baseado no efeito *hall*, que detecta o campo magnético gerado pela passagem de corrente e gera uma voltagem proporcional na saída do módulo.

Os motores *brushless* possuem como característica, quando comparados a outros motores, a alta eficiência, vida útil longa e a elevada capacidade de carga. O diferencial deve-se a concepção construtiva, em que a parte externa do motor é ligada a hélice, proporcionando maior torque. Dessa maneira, para definição dos valores de torque existem dois métodos que podem ser utilizados. O primeiro, utilizando um sensor que

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção



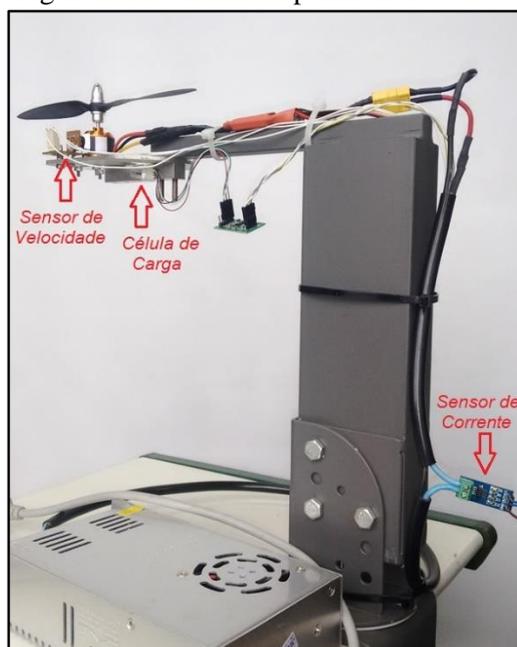


mede a quantidade de força de rotação que o motor exerce e o segundo por meio de método empírico, utilizando de experiências práticas e fazendo uso de equacionamento matemático.

#### 4 RESULTADOS E ANÁLISE

A Figura 2 ilustra a plataforma experimental, a partir da qual o aluno pode realizar ensaios e constatar o comportamento das grandezas supracitadas. Os dados adquiridos possibilitam a observação do comportamento do conjunto hélice-motor.

Figura 2. Plataforma experimental



Testes preliminares foram realizados a fim de constatar o comportamento do sistema na medição do empuxo e velocidade angular. O módulo propulsor que o aluno poderá utilizar para realizar os ensaios está descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do Sistema de Propulsão

Motor	Marca Turnigy Modelo 2826 – 1400KV
ESC	Marca RED Brick 21A
Hélice	9x3,8”

Os resultados que deverão ser obtidos, nos ensaios realizados pelos alunos, devem conter o comportamento ilustrado graficamente na Figura 3 para o empuxo, na Figura 4 para a velocidade angular e na Figura 5 para o torque.

Organização



Promoção





Figura 3 – Comportamento do EMPUXO

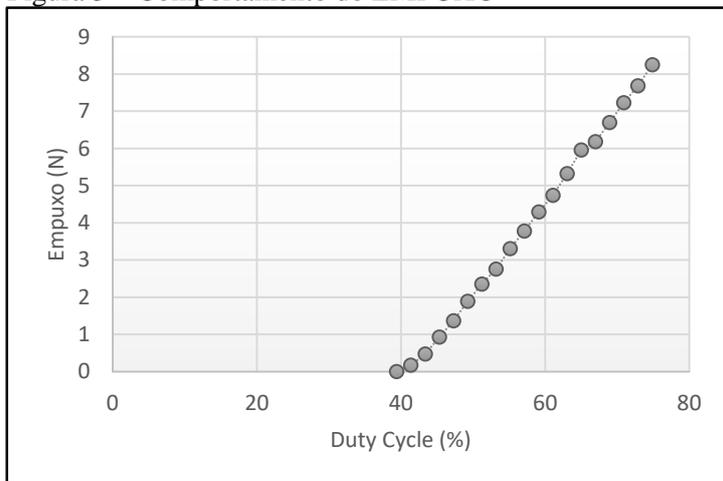


Figura 4 - Comportamento da VELOCIDADE ANGULAR

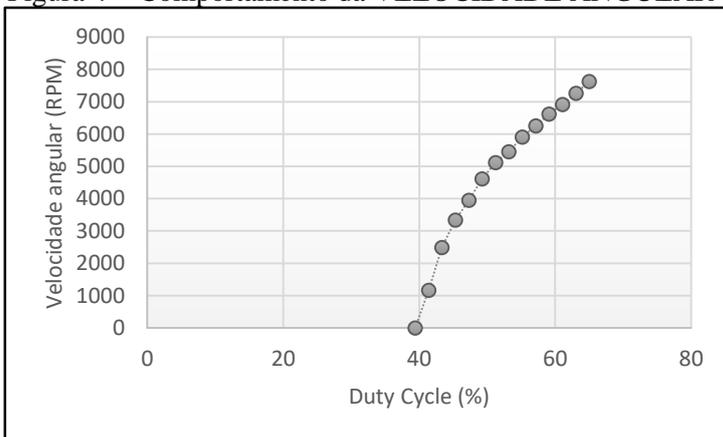
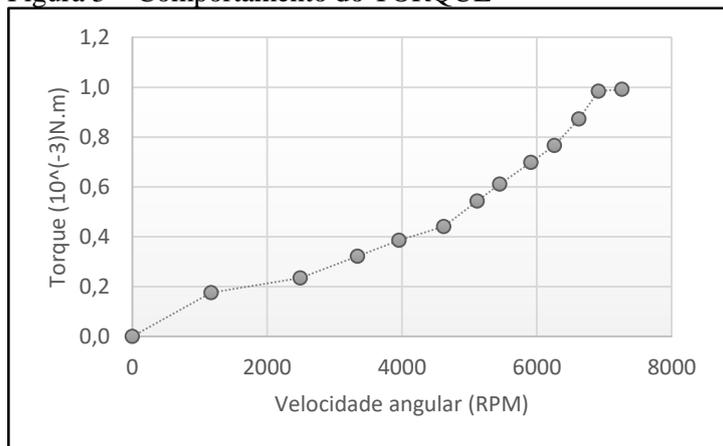


Figura 5 – Comportamento do TORQUE



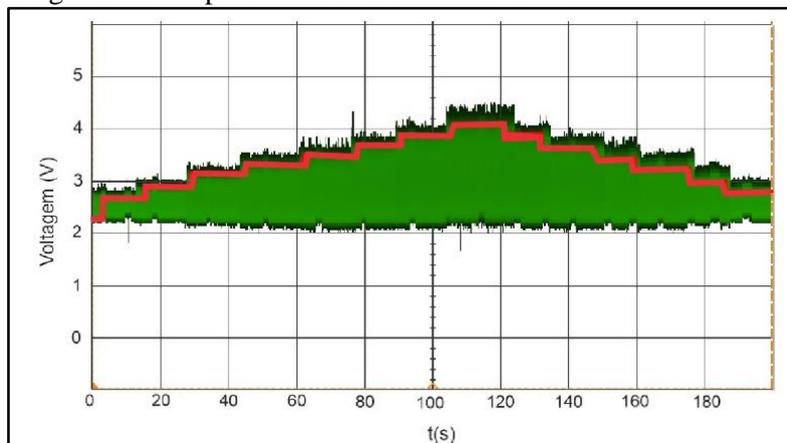
A Figura 6 ilustra o comportamento da voltagem obtida por meio de sensor. Esse sensor relaciona a corrente elétrica drenada pelo motor com um valor de voltagem.

Organização

Promoção



Figura 6 - Comportamento da corrente elétrica



### Discussão

A estrutura física tem como base de sustentação uma armação metálica que permite rotação. Em sua extremidade é alocada a célula de carga, que atua como apoio para o propulsor, e uma estrutura onde está fixado o sistema de leitura da velocidade. O sensor de corrente é conectado ao cabo da fonte que alimenta o conjunto. Os dados são salvos em arquivo \*.txt e podem ser manipulados para gerar gráficos e tabelas.

No teste do empuxo, o sinal de referência é o PWM. De acordo com a variação do ciclo de trabalho, é possível aumentar a velocidade do motor, e conseqüentemente o empuxo será alterado. Entre as variáveis existe uma relação linear. Portanto, por meio do resultado ilustrado na Figura 3, o aluno poderá constatar que com o aumento do *duty cycle*, o empuxo cresce linearmente.

Assim como na medição do empuxo, no teste da velocidade angular o sinal de entrada é o PWM. Porém nessa avaliação, por meio da Figura 4, o aluno poderá constatar que a variável apresenta um comportamento acentuado para valores menores, tendendo a linearidade quando o valor do ciclo de trabalho ultrapassa 50%. Cabe salientar que os valores de empuxo e velocidade angular iniciam com aproximadamente 40% do ciclo de trabalho do PWM devido a frequência utilizada para acionar o motor. Isso resulta em perda de informação e deve ser alterado para obter melhores resultados.

Após a aquisição dos valores de empuxo e velocidade angular, o torque é obtido de forma empírica. O resultado é ilustrado na Figura 5. Esse teste não é considerado ideal uma vez que apresenta valores obtidos teoricamente. Para valores satisfatórios é necessário a implementação de sensor para efetuar a medição. Porém com a utilização do equacionamento, o aluno poderá descrever o comportamento da variável.

No caso da corrente elétrica, o resultado apresentado na Figura 6 foi obtido com osciloscópio e ilustra, em cor verde, a presença acentuada de ruído na leitura do sinal. Essa interferência na aquisição deve ser corrigida por meio de filtros, com o intuito de tornar a leitura acurada. A linha de cor vermelha representa o comportamento que a corrente deve ter. Além disso, é possível observar uma voltagem de *offset* de aproximadamente 2,5V. A mesma é característica do sensor.

Neste trabalho aplicam-se conceitos físicos como base para o desenvolvimento de uma plataforma experimental. Destina-se, além de testar sistemas propulsores eletromecânicos, reforçar o conhecimento obtido pelos alunos em sala de aula, sob forma de

Organização



Promoção





instrumento de medição. A realização dos testes possibilita representar graficamente os valores dessas grandezas observáveis, auxiliando na sua interpretação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de veículos multirrotores em diversas aplicações aumenta a necessidade de investigações acerca do desempenho dessas aeronaves. No meio acadêmico há fenômenos físicos que retratam o comportamento desses sistemas. A aplicação de plataformas experimentais, na verificação de grandezas de difícil observação, é direcionada para criar um instrumento de medição que reforce o conhecimento do aluno adquirido em aula teórica. Os experimentos proporcionam a observação e quantificação dos eventos inerentes ao sistema, em que a dinâmica do mesmo é representada por sinais obtidos através de módulos de aquisição. A estrutura da plataforma mostrou-se satisfatória, pois apresentou rigidez suficiente para manter o correto funcionamento do conjunto. Os dados obtidos mostraram-se satisfatórios e representaram adequadamente a dinâmica comportamental do conjunto motor-hélice, o que torna o sistema confiável para ser utilizado no ensino das disciplinas. No entanto, o comportamento do torque é ideal e não retrata fielmente o sistema. Outros testes são apresentados na literatura técnica decorrentes da aplicação de dinamômetros, os quais serão estudados posteriormente. Quanto a estrutura, a mesma oferece risco ao aluno, pois não possui proteção em torno do propulsor. Essa deverá ser modificada a fim de garantir a segurança dos mesmos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Flávio Kieckow pelo suporte, à UNIJUÍ (Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul) e ao GAIC (Grupo de Automação Industrial e Controle).

## 6 REFERÊNCIAS

CHÉRON, C. et al. **A multifunctional HIL testbed for multicopter VTOL UAV actuator.** *IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA)*, Qingdao, ShanDong, p. 1-5, 2010.

FAUNDES, N. et al. **Research paper on the topic of different UAV drive train qualification and parameter sets.** *IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, East Syracuse, NY, p. 1-15, 2013.

GABRIEL, D. L.; MEYER, Johan e PLESSIS, du Francois. **Brushless DC Motor Characterisation and Selection for a Fixed Wing UAV.** *Africon – The Falls Resort and Conference Centre*, Livingstone, Zambia, p. 1-6, 2011.

LEISHMAN, J. G. **Principles of Helicopter Aerodynamics.** Cambridge Aerospace Series. 2 Ed. 2006.

WERNECK, Marcelo Martins. **Transdutores e Interfaces.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. LTC - Livros Técnicos Científicos S.A. 1996.

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





## **EDUCATIONAL RESOURCE FOR TESTING THE PROPULSION SYSTEM OF MULTIRROTOR VEHICLES**

**Abstract:** Nowadays, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are becoming popular in civil applications. The need for models with high performance and efficiency turn these aircraft into the object of study of research groups. The performance of the aircraft depends on the propulsion system, which consists of the propeller, the engine and the speed controller. This setting is also a motivational agent for teaching/learning in engineering courses. Thus, the objective of this work is to develop an experimental platform to work as a measurement instrument, allowing the student to analyze the physical variables that directly influence the behavior of those systems. The methodology develops from the project of data acquisition modules to their construction. The result contributes to the teaching of engineering courses.

**Key-words:** Didactic Platform, Propeller, RPA.

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



**UNISOCIESC**  
Educação e Tecnologia

Promoção



**ABENGE**  
Associação Brasileira de Educação em Engenharia