

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

*FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA
EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO COM VAZÃO VARIÁVEL*

PAN CHENXIANG

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2013

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ENERGÉTICA E
ECONÔMICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO COM VAZÃO VARIÁVEL**

PAN CHENXIANG

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Richard Magdalena Stephan, Dr. Ing.
(Orientador)

Samuel Moreira Duarte Santos, Eng.
(Orientador)

Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

Carlos Aparecido Ferreira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois a Ele e para Ele são e serão toda honra e toda glória, referentes à todas as conquistas da minha vida.

À minha família, que sempre me apoiou nos meus objetivos, e não foi diferente durante este projeto. Em especial a minha avó, que partiu durante minha trajetória na universidade, mas que sempre foi uma incentivadora e uma avó bastante orgulhosa.

Ao meu professor e orientador: Richard Magdalena Stephan, que apesar da minha desorganização e prazos apertados, demonstrou flexibilidade e se esforçou juntamente para que este projeto fosse concluído.

Aos profissionais do Procel: Carlos Aparecido Ferreira, Samuel Moreira Duarte Santos e Luis Felipe Gomes, que abriram as portas da empresa e compraram a ideia do projeto. Deram-me todo suporte necessário, com profissionalismo e paciência.

Ao meu amigo e “irmão”: Jacson Hwang, que me auxiliou nos momentos mais críticos, com conhecimento e dedicação.

A todos os meus amigos e colegas, que contribuíram direta, ou indiretamente, pra que este objetivo fosse alcançado.

*“(...) em todas as coisas somos mais que
vencedores por meio daquele que nos amou (...)”
Romanos 8:37*

RESUMO

As preocupações com o uso desenfreado das fontes de energia, a degradação ambiental e crise financeira, tem resultado em estudos mundiais em busca de um uso mais consciente e eficiente da energia elétrica.

Um dos principais alvos destes estudos encontra-se nos sistemas motrizes de bombeamento, pois possui um peso significativo dentro das instalações industriais, setor que mais consome energia elétrica no Brasil e em outros países.

Neste trabalho o sistema motriz é dividido em quatro partes: alimentação, motor, transmissão e carga alimentada (ex: bombas, ventiladores, compressores, etc.). O estudo da eficiência deste sistema precisa levar em consideração os componentes destes quatro blocos, assim como a interação entre eles.

No mercado de ferramentas computacionais, existe demanda por programas que auxiliem este estudo sistêmico, pois muitos dos existentes atendem necessidades específicas de componentes de apenas um dos blocos. Uma ferramenta, desenvolvida com o objetivo de suprir esta necessidade de integração, é o Motor Systems Tool, que faz parte de um projeto de eficiência da Agencia Internacional de Energia. Ela, porém, ainda possui várias limitações, sendo a impossibilidade de se determinar o rendimento da carga dinamicamente, em função do ponto de operação, a mais significativa.

Partindo da ideia do Motor Systems Tool, foi desenvolvida a ferramenta PAN MotorSYS, sendo levado em consideração as necessidades do Procel, instituição brasileira responsável em promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica. Este programa segue os conceitos teóricos adotados pelo Procel em seus estudos. Totalmente alinhado com suas metodologias, o *software* desenvolvido nesse projeto de fim de curso toma como base os dados de motores do programa BDMotor, ferramenta da Eletrobras para dimensionamento de motores elétricos.

O PAN MotorSYS retorna a eficiência energética e econômica para um sistema motriz, onde se deseja substituir o controle mecânico por acionamento eletrônico de velocidade variável, além de informar, também, o tempo de retorno (*payback*) do investimento feito para a aquisição do inversor de frequência.

ABSTRACT

Concerns about the rampant use of energy sources, environmental degradation and financial crisis has resulted in global studies in search of a more conscious and efficient use of electricity.

One of the main targets of these studies lies in the pumping motor systems, because it has a significant weight within the industrial sector, which consumes more electricity in Brazil and other countries.

In this work, the drive system is divided into four parts: power, engine, transmission and load supplied (eg pumps, fans, compressors, etc.). The study of the efficiency of this system needs to consider the components of these four blocks, as well as the interaction between them.

In the market for computational tools, there is demand for programs that assist this systemic study because many of the existing components meet specific needs of only one of the blocks. One tool, developed to meet this need for integration is the Motor Systems Tool, which is part of an efficiency project of the International Energy Agency. However, it still has several limitations, and the inability to determine the yield of the load dynamically as a function of operating point, the most significant.

Starting from the Motor Systems Tool idea, the PAN MotorSYS tool was developed, being taken into consideration the needs of Procel, Brazilian institution responsible for promoting the rationalization of production and consumption of electricity. This program follows the theoretical concepts adopted by Procel in their studies. Fully aligned with their methodologies, the *software* developed in this project takes as limit the data base engine program BDMotor, Eletrobras tool for design of electric motors.

The PAN MotorSys returns energy efficiency and economic motives for a system where if you want to replace the mechanical control by electronic variable speed drive and inform also the payback of the investment made to acquire the inverter frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva Vazão x Pressão	9
Figura 2 - Geração de sinal PWM.....	12
Figura 3 - Circuito inversor CC-CA	12
Figura 4 - Curva tensão x frequência.....	13
Figura 5 - Tela inicial BDMotor	15
Figura 6 - Tela de trabalho BDMotor	16
Figura 7 - Tela de comparação BDMotor	16
Figura 8 - Comparação <i>Novo x Novo</i> BDMotor	17
Figura 9 - Comparação <i>Em Uso x Novo</i> BDMotor	18
Figura 10 - Comparação <i>Reparar x Novo</i> BDMotor	18
Figura 11 - Tela de dimensionamento BDMotor	19
Figura 12 - Dimensionamento por <i>Corrente</i> BDMotor	20
Figura 13 - Dimensionamento por <i>Potência</i> BDMotor	20
Figura 14 - Comparação por <i>Escorregamento</i> BDMotor	21
Figura 15 - Tela inicial Motor Systems Tool	23
Figura 16 - Tela de escolha MST	24
Figura 17 - Escolha da carga MST	25
Figura 18 - Escolha de transmissão MST	25
Figura 19 - Escolha motor MST	26
Figura 20 - Escolha da alimentação MST	26
Figura 21 - Tela principal MST	27
Figura 22 - Tabela de escolha do motor MST	28
Figura 23 - Tela de abertura – PAN MotorSYS	30
Figura 24 - Tela inicial – PAN MotorSYS	30
Figura 25 - Tela de importação – PAN MotorSYS	31
Figura 26 - Definir área a ser importada – planilha Excel	31
Figura 27 - Seleção do arquivo de importação – PAN MotorSYS	33

Figura 28 - Seleção do arquivo de importação – PAN MotorSYS	33
Figura 29 - Lista de nomes de seleção – PAN MotorSYS	33
Figura 30 - Seleção da tabela do banco para importação – PAN MotorSYS	34
Figura 31 - Tela de importação preenchida – PAN MotorSYS	34
Figura 32 - Tela para mapear os campos de importação – PAN MotorSYS	35
Figura 33 - Tela para mapear os campos de importação – PAN MotorSYS	36
Figura 34 - Mensagem de aviso ao mapear – PAN MotorSYS	36
Figura 35 - Tela de importação (antes) – PAN MotorSYS	37
Figura 36 - Tela de importação (depois) – PAN MotorSYS	38
Figura 37 - Tela de seleção da carga – PAN MotorSYS	39
Figura 38 - Seleção de fluido – PAN MotorSYS	40
Figura 39 - Tela de seleção da carga – PAN MotorSYS	40
Figura 40 - Gráfico da bomba pelo fabricante	41
Figura 41 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (manual) – PAN MotorSYS	41
Figura 42 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (imagem) – PAN MotorSYS	42
Figura 43 - Carregar gráfico do fabricante – PAN MotorSYS	42
Figura 44 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (imagem) – PAN MotorSYS	43
Figura 45 - Definição do ponto de origem do gráfico – PAN MotorSYS	44
Figura 46 - Definição do ponto máximo do gráfico – PAN MotorSYS	44
Figura 47 - Pontos da curva do gráfico do fabricante – PAN MotorSYS	45
Figura 48 - Modo de entrada de dados do gráfico do fabricante	45
Figura 49 - Ciclo de trabalho – PAN MotorSYS	46
Figura 50 - Tela de seleção de acoplamento – PAN MotorSYS	46
Figura 51 - Entrada manual do rendimento de acoplamento – PAN MotorSYS	47
Figura 52 - Cálculo de rendimento do acoplamento – PAN MotorSYS	48
Figura 53 - Tela de seleção do motor – PAN MotorSYS	48
Figura 54 - Entrada manual de dados do motor – PAN MotorSYS	49
Figura 55 - Seleção dos motores cadastrados – PAN MotorSYS	49
Figura 56 - Lista de motores cadastrados – PAN MotorSYS	49

Figura 57 - Dados do motor selecionado – PAN MotorSYS	50
Figura 58 - Tela de cálculo – PAN MotorSYS	50
Figura 59 - Resultado visto em tela do controle por válvula – PAN MotorSYS	51
Figura 60 - Resultado visto em tela do controle por inversor – PAN MotorSYS	51
Figura 61 - Resultado da comparação – PAN MotorSYS	52
Figura 62 - Tela de configurações – PAN MotorSYS	52
Figura 63 - Gráfico do da bomba – Tipo KSB Meganorm 50-160 com rotor 174 ...	57
Figura 64 - Entrada de dados do exemplo – PAN MotorSYS	58
Figura 65 - Pontos do gráfico do fabricante – PAN MotorSYS	58
Figura 66 - Rendimento do acoplamento mecânico – PAN MotorSYS	59
Figura 67 - Escolha do motor para o exemplo – PAN MotorSYS	59
Figura 68 - Dados do motor escolhido para o exemplo – PAN MotorSYS	60
Figura 69 - Resultado do exemplo com controle por válvula – PAN MotorSYS	60
Figura 70 - Resultado do exemplo com controle por inversor – PAN MotorSYS ...	61
Figura 71 - Tabela de comparação – PAN MotorSYS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da apostila para controle por válvula	59
Tabela 2 - Resultados da apostila para controle por inversor.....	59
Tabela 3 - Resultados da apostila para economia do sistema.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4E	Efficient Electrical End-Use Equipment
A	Ampere – Unidade de medida de corrente elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIE	Agência Internacional de Energia
ASD	Adjustable Speed Drive
BEN	Balanço Energético Nacional
BEU	Balanço de Energia Útil
BHP	Break Horse Power
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
cv	Cavalo Vapor – Unidade de medida de potência
DB	Data Base
Eletronbras	Centrais Elétricas Brasileiras
EMSA	Electrical Motor Systems Annex
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EREC	European Renewable Energy Council
GERIAP	Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific
hp	Horse Power – Unidade de medida de potência
IEC	International Electrotechnical Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MME	Ministério de Minas e Energia
MST	Motor Systems Tool
PNE	Plano Nacional de Energia
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	Pulse Width Modulation
Reduc	Refinaria de Duque de Caxias
RGR	Reserva Global de Reversão
RPM	Rotações Por Minuto – Unidade de medida de rotação
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNEP	United Nations Environment Programme
VBA	Visual Basic for Applications
W	Watt – Unidade de medida de potência elétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Trabalho Anterior na UFRJ	3
1.4. Outros Trabalhos que Motivaram o Presente Projeto Final.....	4
1.5. Organização do Trabalho	5
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	7
2.1. Conceito Básico.....	7
2.2. PROCEL	8
2.3. Conceitos Eletromecânicos	9
2.4. Conversores Eletrônicos de Frequência	11
3. BDMOTOR.....	15
3.1. Apresentação do Sistema.....	15
3.2. Comparação entre dois motores.....	16
3.3. Dimensionamento de motor em uso	19
3.4. Interação com o projeto	21
4. MOTOR SYSTEMS TOOL	23
4.1. Apresentação do Sistema.....	23
4.2. Funcionamento.....	24
4.3. Contexto no projeto	28
5. PAN MOTORSYS	29
5.1. Apresentação do Sistema.....	29
5.2. Banco de Dados.....	30
5.3. Módulo: Importar	31
5.4. Módulo: Calcular.....	38
5.4.1 Carga.....	38
5.4.2 Acoplamento.....	46

5.4.3	Motor	48
5.4.4	Cálculo	50
5.5.	Módulo: Configurações.....	52
5.6.	Resultados	52
5.7.	Pontos a Melhorar	56
6.	EXEMPLO	57
6.1.	Enunciado	57
6.2.	Inserção dos Dados no Programa	58
6.3.	Análise dos Resultados	62
7.	CONCLUSÃO.....	64
	ANEXOS.....	67
	ANEXO I – RELATÓRIO FINAL DO EXEMPLO PROPOSTO – PAN MOTORSYS.....	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A preocupação com a sustentabilidade e a competitividade do mercado impulsionam as buscas pelo resultado com a maior eficiência, ou em outras palavras, quanto menos perdas durante o processo, melhor para o planeta e para o bolso.

O setor industrial é o maior consumidor de energia elétrica no Brasil, representando uma fatia de 43,6% (fonte: BEN 2012) [1], segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seu Balanço Energético Nacional (BEN) de 2012. Dentre as instalações industriais, o maior peso fica com os sistemas motrizes, que segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) em seu Balanço de Energia Útil (BEU) de 2005, representa cerca de 64% de toda carga elétrica industrial brasileira (fonte: BEU 2005) [2]. Dos sistemas motrizes, uma das cargas mais significativas são as bombas, que são utilizadas em, praticamente, todas as plantas industriais.

O estudo do sistema motriz está particionado em quatro blocos neste trabalho:

- **ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA:** são os dispositivos utilizados para fornecer os parâmetros elétricos ao motor, determinando os níveis destes parâmetros (ex: tensão, corrente, frequência, etc.) o que altera os pontos de operação do motor elétrico;
- **MOTOR ELÉTRICO:** estudo para obter a melhor escolha do motor, seja para aquisição, substituição ou manutenção. É necessário levar em consideração condições técnicas, ambientais e econômicas;
- **TRANSMISSÃO MECÂNICA:** ou transmissão mecânica, são os equipamentos que conectam mecanicamente o eixo do motor elétrico às cargas (ex: engrenagens, correias dentadas, cintas, etc). Quando não é utilizado nenhum tipo de transmissão, o sistema está com a conexão direta.
- **CARGA ALIMENTADA:** de origem mecânica, são os equipamentos que, efetivamente, realizam a função final desejada. Por exemplo, para retirarmos um líquido de um determinado local a outro utilizamos bombas. Outras cargas comuns são: compressores, refrigeradores, ventiladores/exaustores, entre vários outros.

Cada módulo possui equipamentos distintos com comportamentos e características individuais, os quais são importantes na análise da eficiência, porém só é possível alcançar um resultado consistente ao observar os módulos como parte de um único sistema, levando em consideração as interações destes equipamentos entre si.

No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), vinculado ao MME e executado pela Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras), tem como objetivo: “promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.” [3]

O Procel realiza os estudos de eficiência para informar e conscientizar as pessoas com intuito de adotarem sempre as medidas que eliminem os desperdícios. Para alcançar os resultados destes estudos, e validá-los, são utilizadas ferramentas computacionais, previamente aprovadas.

Essas ferramentas devem possuir uma interface amigável que permita alcançar os objetivos de eficiência, facilitando a análise do sistema como um todo, ao invés de utilizar diversas ferramentas em separado.

Foi encontrado, entre os poucos *softwares* no mercado, através de uma matéria da revista *Eletricidade Moderna* [4], a ferramenta Motor Systems Tool, desenvolvida dentro de um projeto de eficiência energética da Agência Internacional de Energia. Seu conceito, que abrange todas as partes do sistema motriz, foi aceito com bastante entusiasmo pelo Procel, porém foram identificadas limitações que dificultavam sua utilização de forma oficial. O Motor Systems Tool será apresentado mais a frente, na seção 4.

Partindo da ideia conceitual do Motor Systems Tool, iniciou-se o desenvolvimento deste trabalho, com o objetivo de suprir as demandas expostas pelo Procel neste setor.

1.2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, de interface amigável ao usuário, que forneça a eficiência energética e

as vantagens econômicas de se substituir um controle mecânico em um sistema motriz por um acionamento eletrônico.

Mais especificamente, o programa será desenvolvido para um sistema de bombeamento, com uma bomba centrífuga com pás viradas para trás, alimentado por um motor elétrico, com acoplamento mecânico direto, comparando a eficiência ao substituir a regulação por válvula de controle por um inversor de frequência.

Apesar de ser uma ferramenta para um objetivo tão específico, o desenvolvimento será de forma em que se possa implementar novas funcionalidades, como novas cargas, novos tipos de acoplamentos mecânicos, novos motores, etc. de uma maneira fácil no futuro.

1.3. Trabalho Anterior na UFRJ

Foi apresentado na EPE'95 (6ª European Power Electronics Conference), realizado no ano de 1995 em Sevilla, Espanha, um estudo realizado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em conjunto com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e a Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), além de ser parcialmente financiado pelo Procel [5].

O principal objetivo deste estudo foi a aplicação de um acionamento de velocidade ajustável (*adjustable speed drive, ASD*) para controlar o fluxo de óleo em uma refinaria. Para isso foi escolhido a REDUC, uma refinaria da Petrobrás, devido à proximidade física a UFRJ e ao CEPEL. Os ASD foram instalados em substituição as válvulas de estrangulamento e foram analisados os parâmetros de economia energética, tempo de retorno do investimento e de qualidade de energia.

Estudos anteriores [6] já haviam indicado o potencial econômico dos ASD com um rápido retorno do investimento, para bombas centrífugas de até 40 kW.

Foram escolhidas duas bombas dentre as 3000 instaladas na refinaria e esta escolha envolveu engenheiros de processo, eletricitas e mecânicos. Por motivos de segurança as bombas selecionadas precisavam ter unidades reservas e foram levadas em consideração as prioridades da refinaria.

Em paralelo a estas tarefas técnicas, foram feitos esforços junto a fornecedores de ASD e duas empresas concordaram em ceder por empréstimo dois equipamentos que foram instalados para os testes.

Uma das bombas escolhidas, a de controle de nível, localizada na Unidade de Craqueamento Catalítico de Flúidos (Unidade 1250), teve o ASD instalado em substituição a uma válvula de estrangulamento na malha de vazão. O motor que aciona a bomba é uma máquina de indução de 30 kW, de dois polos e a prova de explosão.

A segunda bomba é de controle de vazão localizada na Unidade de Destilação Atmosférica e a Vácuo de Óleo Cru (Unidade 1510), que tem a função de bombear combustível de aviação. De acordo com o tipo de combustível a ser processado, a vazão de bombeamento é modificada através de uma válvula de controle. O ASD foi instalado em substituição a esta válvula, que foi mantida totalmente aberta para os testes. O motor que aciona a bomba é uma máquina de indução de 37,5 kW, de dois polos e a prova de explosão.

Os parâmetros mecânicos medidos foram: vazão, pressões de sucção e descarga, e temperaturas ambiente e de caixa do motor. Dos parâmetros elétricos foram medidos a potencia ativa e a energia. Um voltímetro e um amperímetro foram também utilizados para monitorar a operação do sistema de acionamento. As formas de ondas foram analisadas através de um osciloscópio e, periodicamente, de um analisador de espectros.

As medições foram realizadas em condições semelhantes à de produção para validar a comparação do consumo de energia, com e sem o ASD. Os resultados encontrados foram impressionantes, com um percentual de economia próximo a 95% e o tempo de retorno menor do que um ano.

Este foi o primeiro projeto demonstrativo financiado pelo Procel, de incentivo ao uso de ASD em indústria Química e Petroquímica.

Outras vantagens do ASD são: baixa corrente de partida, melhor fator de potência, boa gama de variação de velocidade e baixa manutenção mecânica, que pode ser considerada no cálculo do tempo de retorno econômico.

1.4. Outros Trabalhos que Motivaram o Presente Projeto Final

Foi realizado um estudo para o projeto GERIAP (*Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific*) [7] que faz parte da UNEP (*United Nations Environment Programme*), para implantação de ASD no controle das bombas

do purgador, de combustível pesado e de água do moinho, instalados na Companhia Nacional de Papel e Celulose das Filipinas. Por se tratar de uma empresa de grande porte, os resultados foram expressivos. Concluiu-se que é possível ter o retorno do investimento em, aproximadamente, 16 meses e a economia de energia durante o ano seria de mais de 1 GWh e reduziria a emissão de CO₂ em 225 toneladas. Mais do que o fator econômico, o que impressiona é o consumo e emissão de gás carbônico que poderiam ser evitados com a implementação do acionamento eletrônico.

Outra publicação interessante está na edição de Fevereiro de 2013 da revista *O Setor Elétrico* [8]. A aplicação dos inversores de frequência é cabível não apenas em sistemas de bombeamento, mas em todo tipo de sistema em que possa variar a velocidade da carga, com intuito de consumir menos, quando não há essa solicitação. Os resultados apresentados foram levantados após o estudo em 14 sistemas e obteve-se êxito em 11 deles, com ganhos entre 36% e 58%. O tempo de retorno máximo foi de 39 meses, pouco mais que três anos.

Porém, foram listados também algumas barreiras que dificultam esta implementação no cenário brasileiro:

- Legislação desfavorável a investimentos industriais em energia;
- Ausência ou não adequação das linhas de financiamento para ações de eficiência energética;
- Racionalização de energia compete com outras prioridades de investimento;
- Necessidade de captação de pessoal para identificar as oportunidades de eficiência energética e para fazer a gestão dos projetos que se mostrarem viáveis;
- Aversão a riscos técnicos decorrentes de novas tecnologias que consumam menos energia.

Apesar dos ganhos que podem ser obtidos com esta tecnologia, seria necessário primeiro vencer algumas barreiras, muito mais de caráter culturais e filosóficas do que propriamente técnicas.

1.5. Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em 7 capítulos, compostos da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta os aspectos gerais dos assuntos contemplados no projeto, introduzindo a motivação, o objetivo e trabalhos anteriores referentes ao tema.

Capítulo 2 – Eficiência Energética: descrição básica em relação aos conceitos de eficiência energética, o papel do Procel nesta área e breve descrição sobre conversores eletrônicos de frequência.

Capítulo 3 – BDMotor: breve descrição da ferramenta BD Motor, suas funcionalidades e importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 4 – Motor Systems Tool: breve descrição do *software*, suas funcionalidades e como se encaixa no contexto deste trabalho.

Capítulo 5 – PAN MotorSYS: apresenta o programa desenvolvido durante o projeto, funcionalidades, a base de cálculos, fundamentos teóricos, resultados e aspectos a serem melhorados.

Capítulo 6 – Exemplo: aplicação de um exemplo prático utilizando o programa PAN MotorSYS, analisar o funcionamento passo-a-passo e os resultados finais.

Capítulo 7 – Conclusão: apresenta uma análise conclusiva a respeito do trabalho desenvolvido e comentários a ele relacionados.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1. Conceito Básico

A eficiência energética de um determinado equipamento pode ser medida através da relação entre a potência de saída pela potência de entrada.

Juntamente com as fontes renováveis, a eficiência energética é um dos pilares da política de sustentabilidade para o setor de energia, e pode ser definida como uma ou mais atividades ou tecnologias que tenham por objetivo otimizar o uso e reduzir o desperdício de eletricidade. A eficiência energética possui duas características importantes: econômica e ambiental.

Existe uma importância econômica na conservação energética, que pode ser fruto de uma reação dos consumidores ao aumento dos preços da energia ou pelos esforços de redução de custos, a fim de se tornarem mais competitivos no setor energético.

Considerando um exemplo de uma obra civil, onde 10 operários trabalham na construção de uma parede. Se existisse uma “tecnologia” que permitisse levantar a mesma parede com apenas 5 operários, seria possível a construção de 2 paredes no mesmo intervalo de tempo da construção de apenas uma. Essa otimização do processo acarreta, conseqüentemente, em uma economia final ao projeto.

Da mesma forma, existem tecnologias e práticas que reduzem o consumo de energia para realizar determinados trabalhos. Embora haja um acréscimo no custo de investimento inicial com a implementação da nova “tecnologia”, a médio e longo prazo, a economia alcançada na operação se torna mais vantajosa, economia essa que se reflete diretamente ao consumidor.

Outra preocupação na busca pela eficiência energética, a questão ambiental, existe, pois grande parte da geração e do consumo de energia acarreta em impactos ambientais através de emissões de poluentes. Além disso, algumas fontes energéticas têm se tornados escassos e por isso é, ainda mais necessário, a conservação para não desperdiçar o pouco que resta.

Os últimos relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) ressaltam a importância da eficiência energética como componente importante das ações para estabilização de emissões de gases estufa. A Agência Internacional de Energia (AIE) atribui a ações de eficiência de energia cerca de 65% da contribuição

para estabilizar as emissões de carbono até o ano 2030, contra apenas 12% das fontes renováveis e 10% da energia nuclear (fonte: AIE - World Energy Outlook, 2006). Outro estudo realizado por um consórcio europeu de energias renováveis, a European Renewable Energy Council (*EREC*), também indica um papel significativo e crescente da eficiência energética até 2050.

Em meio ao contexto ambiental e energético atual, a eficiência energética é uma questão que vem ganhando cada vez mais relevância, uma vez que a sociedade contemporânea depende primordialmente de combustíveis fósseis como o petróleo, o carvão e o gás natural, cujas reservas são finitas e precisam ser conservadas, a fim de evitar a escassez dessas fontes energéticas em um futuro próximo.

Por esse motivo, entidades privadas e governamentais vêm desenvolvendo políticas e tecnologias de eficiência energética, para criar e aperfeiçoar meios de realizarmos nossas atividades, otimizando a energia que consumimos e reduzindo o desperdício desta, tentando assim evitar a utilização demasiada de nossos recursos naturais.

Além de contribuir para conservação das fontes de energia, a eficiência energética oferece outras vantagens: preserva o meio ambiente; poupa recursos naturais; diminui os custos de produção; possibilita a produção de bens mais baratos e competitivos; melhora o desempenho econômico de produtos, empresas e residências; reduz a necessidade de investimento em infraestrutura e energia.

2.2. PROCEL

“O objetivo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) é promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais. O Procel foi criado em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, e gerido por uma Secretaria-Executiva subordinada à Eletrobras. Em 18 de julho de 1991, o Procel foi transformado em programa de governo, tendo sua abrangência e suas responsabilidades ampliadas. O programa utiliza recursos da Eletrobras e da Reserva Global de Reversão (RGR) – fundo federal constituído com recursos das concessionárias, proporcionais ao investimento de cada uma. Utiliza, também, recursos de entidades internacionais.” [3]

Faz parte do escopo do Procel o estudo da implementação de inversores de frequência em cargas centrífugas que necessitam de vazões variáveis e que possuem válvulas de estrangulamento para ajustá-las, pois a potência requerida por elas é diretamente proporcional ao cubo da velocidade, a análise de viabilidade técnico-econômica dessas substituições.

2.3. Conceitos Eletromecânicos

É comum a carga de um sistema motriz exigir esforços diferentes durante o dia, para determinadas funcionalidades, como no caso de uma bomba em que precisa fornecer fluxos variados. De forma simples e intuitiva é possível fazer essa regulagem através de uma válvula de controle, onde se ajusta sua abertura para determinar o fluxo desejado. Porém, desta forma, ao reduzir o fluxo, há uma alteração na característica do sistema como pode ser verificado na Figura 1. O ponto A representa o ponto de operação inicial com vazão Q_1 e pressão H_1 . Variando a vazão para o valor de Q_2 , altera-se, também, a curva do sistema e chega-se a um ponto de operação B com pressão H_2 , maior que H_1 .

Outra opção, a mais indicada e utilizada atualmente, consiste no controle do motor por inversor de frequência. Ao regular pelo inversor, quando houver uma variação na vazão do fluido, altera-se a rotação do motor, modificando a curva da bomba, e neste caso, para a mesma variação de vazão de Q_1 para Q_2 , alcança-se um novo ponto de operação C, com pressão H_3 , menor que H_1 .

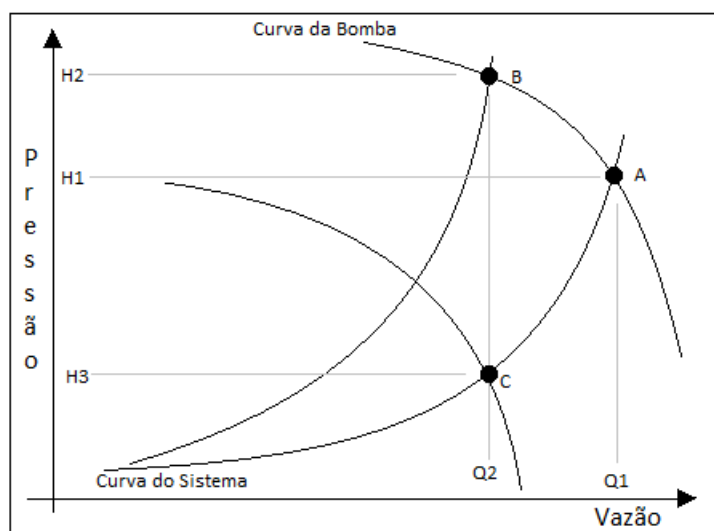


Figura 1 - Curva Vazão x Pressão

A possibilidade de variar a rotação do motor pelo inversor de frequência vem do fato que a rotação é função da frequência de alimentação [9].

$$N = \frac{120 \times f}{n_p}$$

N – rotação

f – frequência

n_p – número de pólos do motor

Entretanto, deve-se garantir o torque que o motor deve oferecer, e isto é possível mantendo-se o fluxo magnético, dado por [9]:

$$\phi_m \times N_e = \frac{V}{4,44f}$$

ϕ_m – fluxo magnético

N_e – número de espiras

V – tensão

f – frequência

Se a relação entre tensão e frequência se mantiver, o fluxo magnético também se manterá, e por consequência, o torque no eixo do motor.

Ao variar a rotação, as cargas centrífugas apresentam as seguintes relações [10]:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^2; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^3$$

Q – vazão

N – rotação

H – pressão estática

P – potência

A vazão varia proporcionalmente à variação da rotação, já a pressão varia ao quadrado. Como a potência é função do produto vazão e pressão, ela varia ao cubo da rotação.

$$P = f(Q \times H)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^3$$

Q – vazão

N – rotação

H – pressão estática

P – potência

Notadamente, o controle por ASD possui mais vantagens econômicas e esta economia é proporcional a $(H2 - H3) \times Q2$. A economia de energia depende, naturalmente, do ciclo de operação, que deve ser considerado na avaliação da economia total.

Os resultados destes estudos são apresentados aos setores industriais pertinentes para a conscientização dos mesmos visando à aplicação das ações de eficiência energética. Por isso a importância de ferramentas que auxiliem nestes estudos, tanto na agilidade das interações dos dados, como também em relatórios finais consolidados, validados por um *software* homologado e reconhecido pelos órgãos competentes e com credibilidade no mercado.

2.4. Conversores Eletrônicos de Frequência

Os conversores eletrônicos de frequência, também chamados de inversores de frequência, são dispositivos capazes de produzir sinais de amplitude e frequência variáveis a partir de fontes CC. Estes operam com dispositivos semicondutores nos estados de saturação e bloqueio [11].

Os dispositivos semicondutores são empregados como chaves eletrônicas e os estados de saturação, ou condução, e de bloqueio podem ser entendidos como as situações de ligada, permitindo passagem de corrente, e desligada, não permitindo, respectivamente.

Para produzir os sinais de amplitude e frequência variáveis é aplicada a modulação por largura de pulsos PWM (*Pulse Width Modulation*), onde um sinal senoidal de controle (v_s) é comparada com uma onda triangular (v_t), conforme Figura 2(a) [11]. A frequência da onda triangular, também chamada de onda portadora, determina a frequência de chaveamento dos elementos semicondutores.

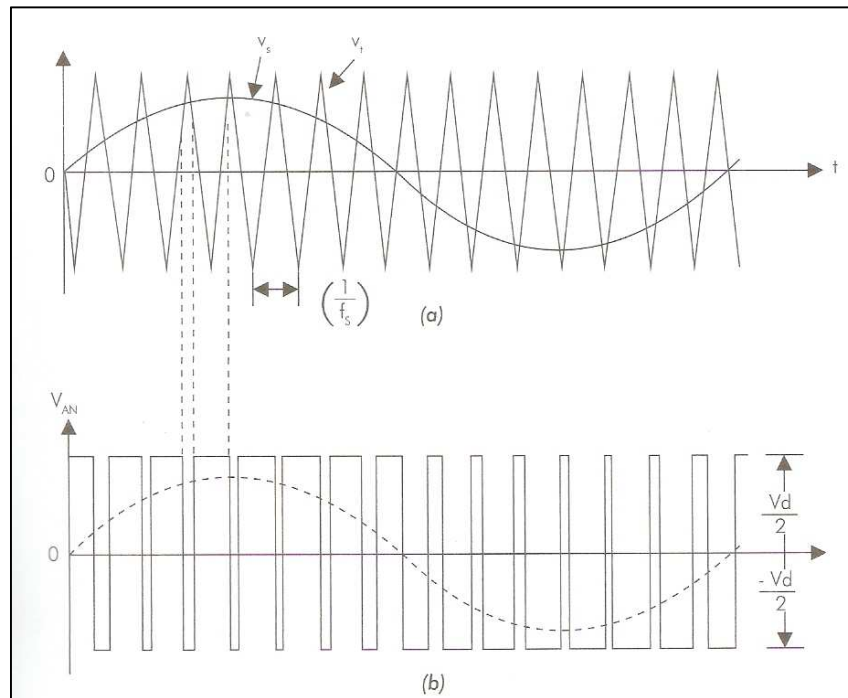


Figura 2 - Geração de sinal PWM

A obtenção de um sinal chaveado com predominância de uma componente de primeiro harmônico de frequência f_1 e amplitude V_1 pode ser obtida a partir de uma tensão contínua V_d aplicando a seguinte lógica de operação ao circuito da Figura 3 [11]:

- $V_s > v_t$, T_{A+} fechada, T_{A-} aberta $\rightarrow V_{AN} = V_d/2$
- $V_s < v_t$, T_{A+} aberta, T_{A-} fechada $\rightarrow V_{AN} = -V_d/2$

Vale ressaltar que as chaves T_{A+} e T_{A-} são complementares, ou seja, não podem estar fechadas ao mesmo tempo, pois ocasionaria um curto-circuito da fonte de alimentação. O resultado da operação está demonstrado na Figura 2(b) [11], onde é indicada em tracejado a componente de primeiro harmônico, ou fundamental.

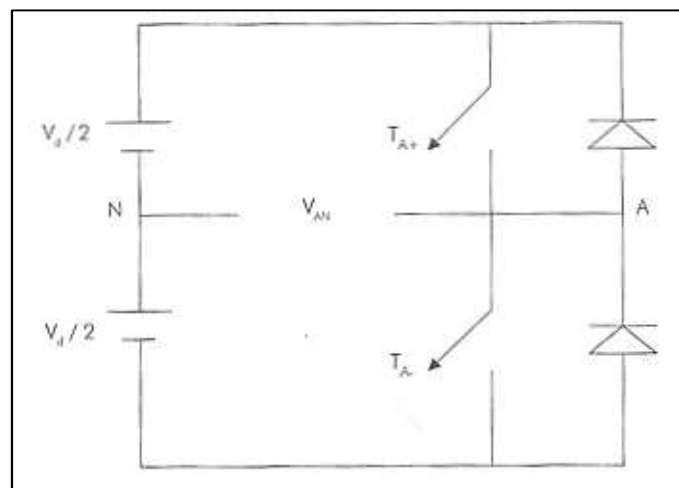


Figura 3 - Circuito inversor CC-CA

O acionamento por velocidade ajustável ASD (*Adjustable Speed Drive*), ou também chamado de acionamento por velocidade variável VSD (*Variable-Speed Drive*), é um dos equipamentos que adota este conceito com o intuito de controlar a velocidade de rotação das máquinas. Comumente são chamados de inversores de frequência.

A adoção de um acionamento eletrônico, apesar de sua praticidade, trás consigo diversos problemas, que serão brevemente citados neste trabalho.

- A capacidade de torque do motor está relacionada ao fluxo magnético, como visto na seção 2.3. Porém para frequências superiores a nominal, a tensão de alimentação é mantida em seu valor máximo, logo a capacidade de torque decresce, já que a razão $\frac{\text{tensão}}{\text{frequência}}$ não se mantém constante. Além disso, para as baixas frequências, os níveis de tensão são pequenos, com isso a queda de tensão na resistência do estator torna-se significativa. A Figura 4 [11] exemplifica a curva tensão x frequência de um motor para frequência nominal de 60 Hertz e tensão de 220 Volts.

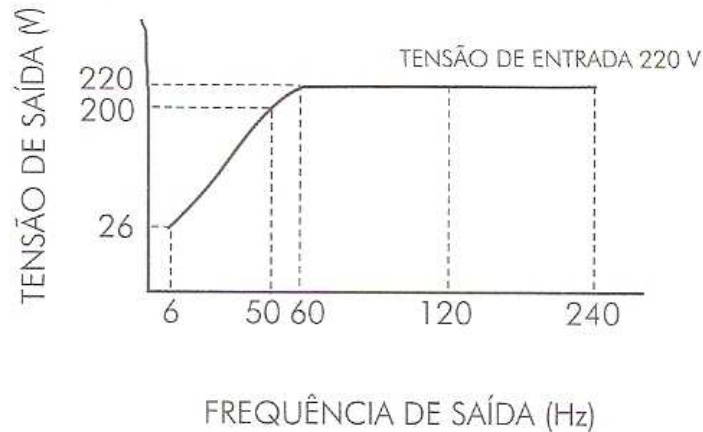


Figura 4 - Curva tensão x frequência

- Os sinais de tensão e corrente produzidos pelos acionamentos eletrônicos podem ser vistos, essencialmente, na condição de regime permanente, como um sinal fundamental, desejada, acompanhada de uma série de sinais em frequências harmônicas, indesejadas. Estas componentes harmônicas produzirão: maior aquecimento dos motores; torques pulsantes; interferências eletromagnéticas; correntes de alta frequência circulantes entre estator e rotor, principalmente através dos mancais [11].

- Os chaveamentos, com transições em tempos inferiores a microssegundos, produzem ondas trafegantes nos cabos de alimentação dos motores elétricos. Para cabos de alimentação com centenas ou milhares de metros, estas ondas, que se refletem nos terminais dos motores, podem resultar em picos de tensão, algumas vezes até maiores que a tensão de alimentação. Este problema pode ser contornado aplicando-se filtros junto ao motor, ou ao acionamento eletrônico [11].

3. BDMOTOR

3.1. Apresentação do Sistema

BDMotor é um *software* desenvolvido pela Eletrobras, com intuito de subsidiar o usuário na aquisição, substituição e reparo de motores elétricos, realizando a análise econômica e o cálculo da carga do motor.

Composto de um banco de dados e dos seguintes módulos de análise:

- **Comparação entre dois motores** – Neste módulo se realiza a análise econômica para subsidiar o usuário na hora da compra, substituição e reparo.
- **Dimensionamento de um motor em uso** – Neste módulo se calcula em que condições de carga o motor se encontra. Foi direcionado no sentido de dimensionar a carga no eixo através de medição de uma das três grandezas de fácil acesso ao usuário, ou a corrente média de linha (A), ou a velocidade (RPM) do eixo, ou a potência trifásica de entrada (kW).
- O banco de dados abrange motores de indução trifásicos com tensões de 220, 380 e 440 V e potência de 0,25 a 250 cv.

Encontra-se, atualmente, na versão v.4.21 de Fevereiro/2008, funciona no idioma Português (brasileiro) e sua licença é gratuita. A Figura 5 mostra a tela de abertura do programa e a Figura 6 a tela de trabalho.



Figura 5 - Tela inicial BDMotor

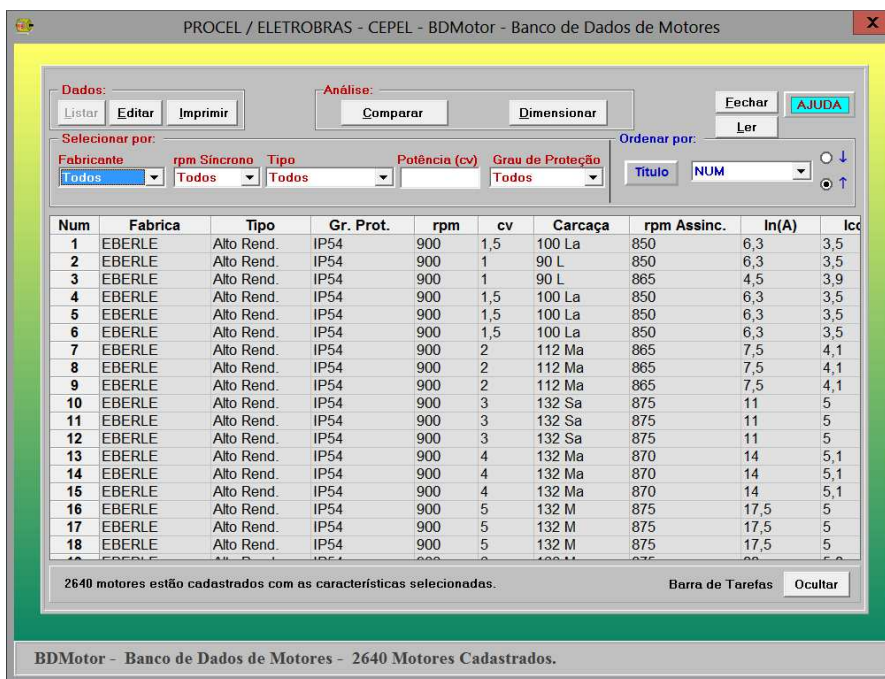


Figura 6 - Tela de trabalho BDMotor

3.2. Comparação entre dois motores

Neste módulo analisa-se economicamente, comparando-se dois motores, seja com intenção de comprar um novo, substituir um existente, ou apenas repará-lo. As opções estão destacadas na Figura 7.

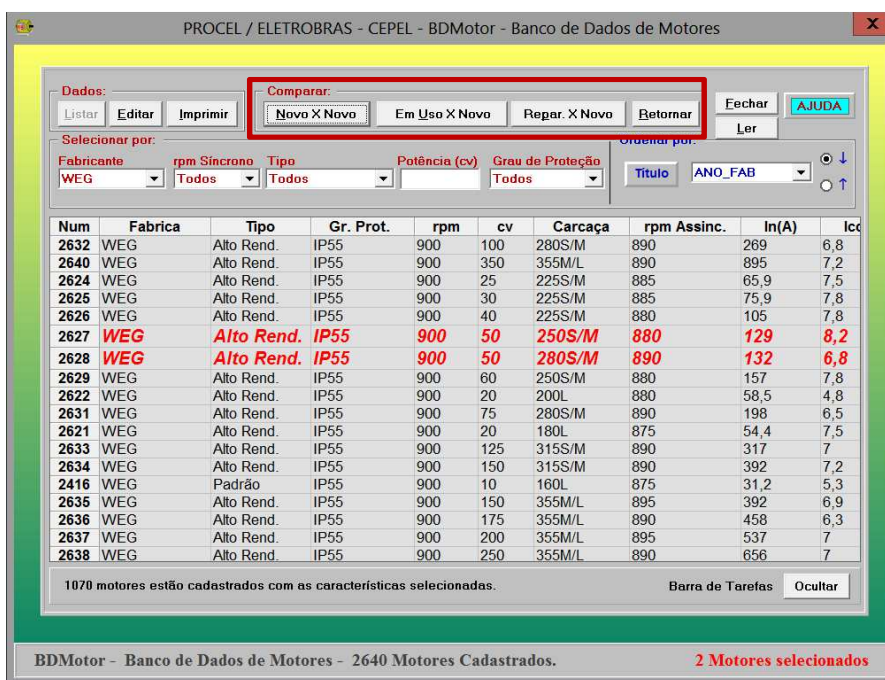


Figura 7 - Tela de comparação BDMotor

As opções de comparação são:

- *Novo x Novo*: comparação com intuito de compra, levando em consideração entre dois motores novos. Caso um motor possua um rendimento maior e preço menor que outro, será automaticamente, indicado como melhor escolha. Em outro caso, em que um motor possua um rendimento melhor, porém seja mais caro, o *software* calcula a diferença do valor de investimento inicial, o consumo ativo ao ano, o tempo necessário para o motor mais caro pagar a diferença inicial (*payback*) e o valor da economia por ano, conforme Figura 8.

Comparação Entre Motores (Novo X Novo)

Motor 2627 - WEG	Motor 2628 - WEG
Potência (cv) 50	Potência (cv) 50
Carga (%) 100	Carga (%) 100
Rendimento (%) 92,6	Rendimento (%) 92,2
Preço (R\$) 14107,52	Preço (R\$) 12500,00
Desconto (%) 0	Desconto (%) 0
Total Horas (Ano) 4380	Total Horas (Ano) 4380

Tarifa média de energia : 0,345 R\$/kWh

Carga Centrífuga : Sim Não

Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)

Motor 2627	Motor 2628
174064,79 kWh	174819,96 kWh
60052,35 R\$	60312,89 R\$

Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 2627

74 meses

Diferença Invest : 1607,52 R\$

Economia por Ano : 260,53 R\$ 755,16 kWh

Executar Fechar Gravar

Figura 8 - Comparação *Novo x Novo* BDMotor

- *Em Uso x Novo*: comparação com intuito de substituir um motor antigo por um novo. Caso o motor novo escolhido possua um rendimento menor que o atual, o *software* indica que esta não é uma boa escolha. Em caso de um rendimento maior o programa calcula o consumo ativo ao ano, o tempo necessário para pagar o valor investido e a economia por ano, conforme Figura 9.

Comparação Entre Motores (Uso X Novo)

Motor 2627 - WEG		Motor 2628 - WEG	
Potência (cv)	50	Potência (cv)	50
Carga (%)	75	Carga (%)	75
Rendimento (%)	91,5	Rendimento (%)	92
Perda Rend. (%)	0	Preço (R\$)	12500,00
Total Horas (Ano)	4380	Desconto (%)	0
		Total Horas (Ano)	4380
Tarifa média de energia : 0,345 (R\$/kWh)		Carga Centrífuga : <input type="radio"/> Sim <input checked="" type="radio"/> Não	
Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)			
132118,03 kWh	45580,72 R\$	131400,00 kWh	45333,00 R\$
Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 2628			
606 meses			
Diferença Invest. : R\$ 12500,00	Economia por Ano : R\$ 247,72 718,03 kWh		Gravar

Figura 9 - Comparação *Em Uso x Novo* BDMotor

- *Reparar x Novo*: comparação com intuito de decidir entre a compra de um novo motor ou o reparo do atual. Se o rendimento do novo motor cogitado for menor que o atual, ele aponta que a escolha do novo motor não é boa. Caso o preço do novo seja menor que o custo de reparo o *software* indica que a compra como a melhor opção, porém se o preço de compra for maior que o de reparo, o programa calcula o consumo ativo ao ano, a diferença de investimento, o tempo necessário ao motor de maior rendimento pagar a diferença investida e a economia por ano, conforme Figura 10.

Comparação Entre Motores (Reparar X Novo)

Motor 2627 - WEG		Motor 2628 - WEG	
Potência (cv)	50	Potência (cv)	50
Carga (%)	75	Carga (%)	75
Rendimento (%)	91,5	Rendimento (%)	92
Perda Rend. (%)	0	Preço (R\$)	12500,00
Reparo (R\$)	3000,00	Desconto (%)	0
Total Horas (Ano)	4380	Total Horas (Ano)	4380
Tarifa média de energia : 0,345 (R\$/kWh)		Carga centrífuga : <input type="radio"/> Sim <input checked="" type="radio"/> Não	
Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)			
132118,03 kWh	15725,35 R\$	131400,00 kWh	15639,89 R\$
Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 2628			
460 meses			
Diferença de invest. : R\$ 9500,00	Economia por Ano : R\$ 247,72 718,03 kWh		Gravar

Figura 10 - Comparação *Reparar x Novo* BDMotor

Vale ressaltar que o programa sempre opta pelo motor de melhor rendimento, visando à eficiência energética, mesmo que esta escolha venha acompanhada de um preço de investimento maior, porém é informado o tempo de retorno do investimento (*payback*).

3.3. Dimensionamento de motor em uso

Neste módulo faz-se a análise do dimensionamento do motor para o sistema contemplado, verificando se o mesmo está: *subdimensionado*, *bem dimensionado* ou *sobredimensionado*.

A verificação do dimensionamento é realizada através de 3 parâmetros diferentes: *corrente*, *potência de entrada* ou *escorregamento*. As opções estão destacadas na Figura 11.

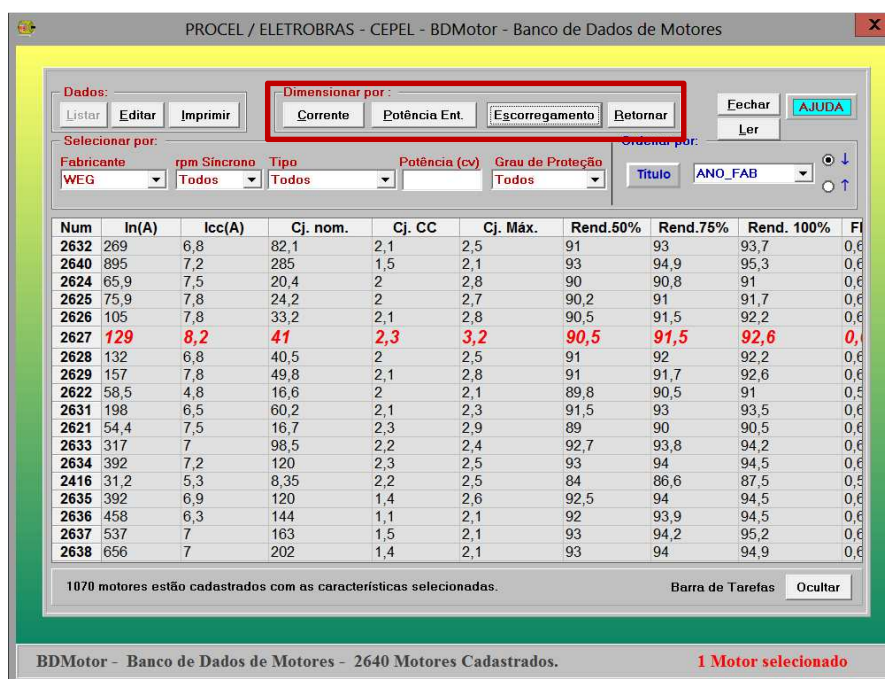


Figura 11 - Tela de dimensionamento BDMotor

- *Corrente*: informar o valor da corrente de operação medida, em Amperes, em que o motor está submetido e o programa compara com os valores nominais para indicar se o motor está trabalhando com uma corrente acima (*subdimensionado*), com uma corrente apropriada (*bem dimensionado*) ou um valor de corrente muito abaixo (*sobredimensionado*), conforme Figura 12.

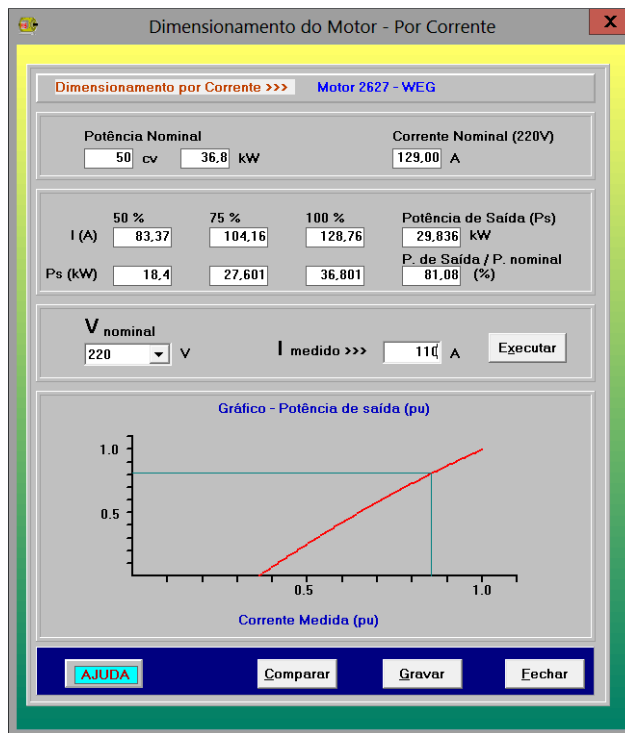


Figura 12 - Dimensionamento por *Corrente* BDMotor

- *Potência de Entrada*: informar o valor da potência de entrada medida, em quilowatts, em que o motor está submetido. O programa compara com os valores nominais e indica o dimensionamento do motor, conforme Figura 13.



Figura 13 - Dimensionamento por *Potência* BDMotor

- *Escorregamento*: informar a rotação medida no eixo do motor. Com este dado o programa calcula a potência de saída e o carregamento nominal para determinar o dimensionamento, conforme Figura 14.

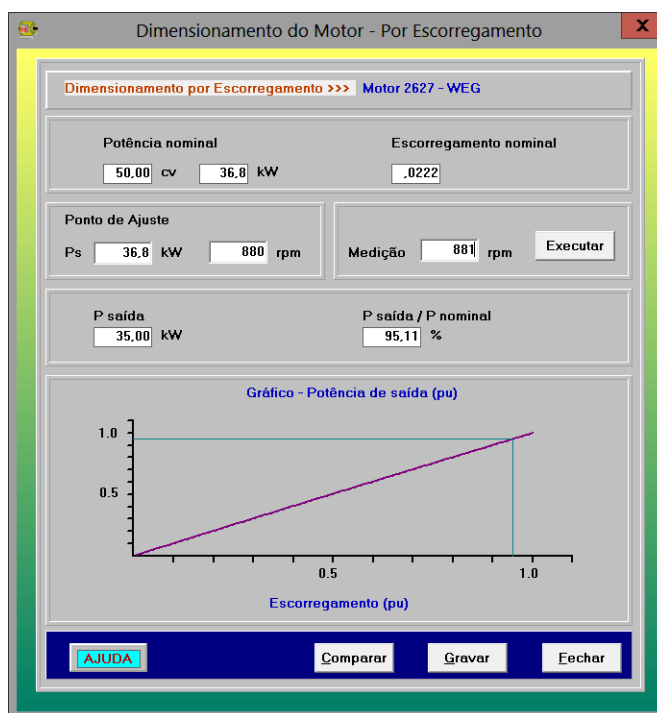


Figura 14 - Comparação por *Escorregamento* BDMotor

3.4. Interação com o projeto

O BDMotor possui uma base de dados, impressionantemente completa em relação a motores elétricos, onde existem cadastrados dois mil e seiscentos e quarenta mil (2.640) motores com as seguintes informações preenchidas:

- Fabricante;
- Tipo;
- Grau de Proteção;
- Rotação Nominal (RPM);
- Potência de Placa (cv);
- Carcaça;
- Rotação Assíncrona (RPM);
- Corrente Nominal (A);
- Corrente de Curto-Circuito (A);
- Conjugado Nominal;

- Conjugado de Curto-Circuito;
- Conjugado Máximo;
- Rendimento a 50%;
- Rendimento a 75%;
- Rendimento a 100%;
- Fator de Potência a 50%;
- Fator de Potência a 75%;
- Fator de Potência a 100%;
- Fator de Serviço;
- Momento de Inércia;
- Tempo de Curto-Circuito;
- Nível de Ruído (dB);
- Peso (kg);
- Preço (R\$);
- Tempo de Garantia (Anos);
- Ano de Fabricação.

Por apresentar um banco tão completo, este será a base de dados de motores elétricos para o projeto, o que representa uma vantagem por não precisar buscar essas informações em diferentes fontes e também por estar alinhado a uma base de dados já validados pela Eletrobras.

4. MOTOR SYSTEMS TOOL

4.1. Apresentação do Sistema

O *Motor Systems Tool* (MST) é um *software* desenvolvido no âmbito do projeto EMSA (*Electrical Motor Systems Annex*) do programa 4E (*Efficient Electrical End-Use Equipment*), caracterizado como colaborativo, ou seja, com participação de vários países, da Agência Internacional de Energia (AIE), voltado para a eficiência energética dos equipamentos elétricos. [4]

O MST é uma ferramenta desenvolvida para cálculo de sistemas motrizes, e que auxilia na seleção do motor elétrico (tipo e potência) visando ajudar os usuários a desenvolver projetos adequados e energeticamente eficientes, pois um projeto ideal deve atender aos requisitos dos processos sem utilizar componentes sobredimensionados, cuja consequência direta reflete em um consumo excessivo de energia. Ela ganha certa relevância por ser uma das poucas ferramentas no mercado que faz a análise do sistema motriz considerando todas as componentes: *acionamento, motor elétrico, transmissão mecânica e carga*.

Em cada um destes módulos existe uma gama de opções de componentes e liberdade de ajuste dos parâmetros para melhor simulação do sistema desejado. Atualmente o programa está na versão v.1.53 de Janeiro/2013, funciona no idioma Inglês, com licença gratuita e adota a norma IEC 60034-30 (*International Electrotechnical Commission*) de eficiência energética. A Figura 15 mostra a tela de abertura do programa.

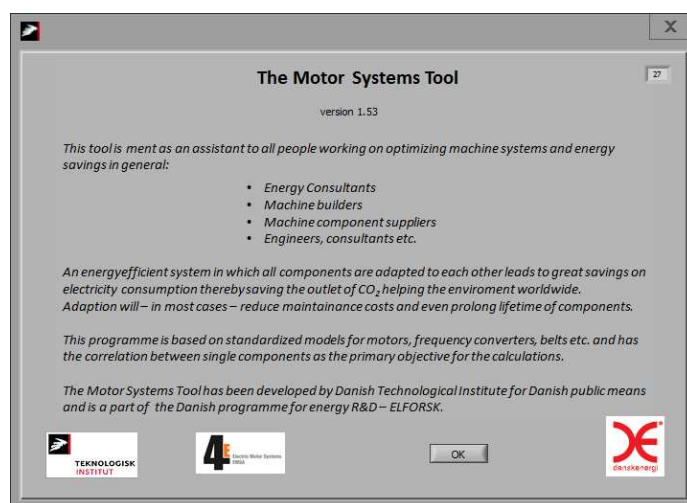


Figura 15 - Tela inicial Motor Systems Tool

4.2. Funcionamento

O *software* parte das escolhas dos tipos de componentes que formam o sistema motriz a ser simulado. A tela de escolha está demonstrada na Figura 16.

- Carga;
- Transmissão Mecânica;
- Motor Elétrico;
- Alimentação Elétrica.

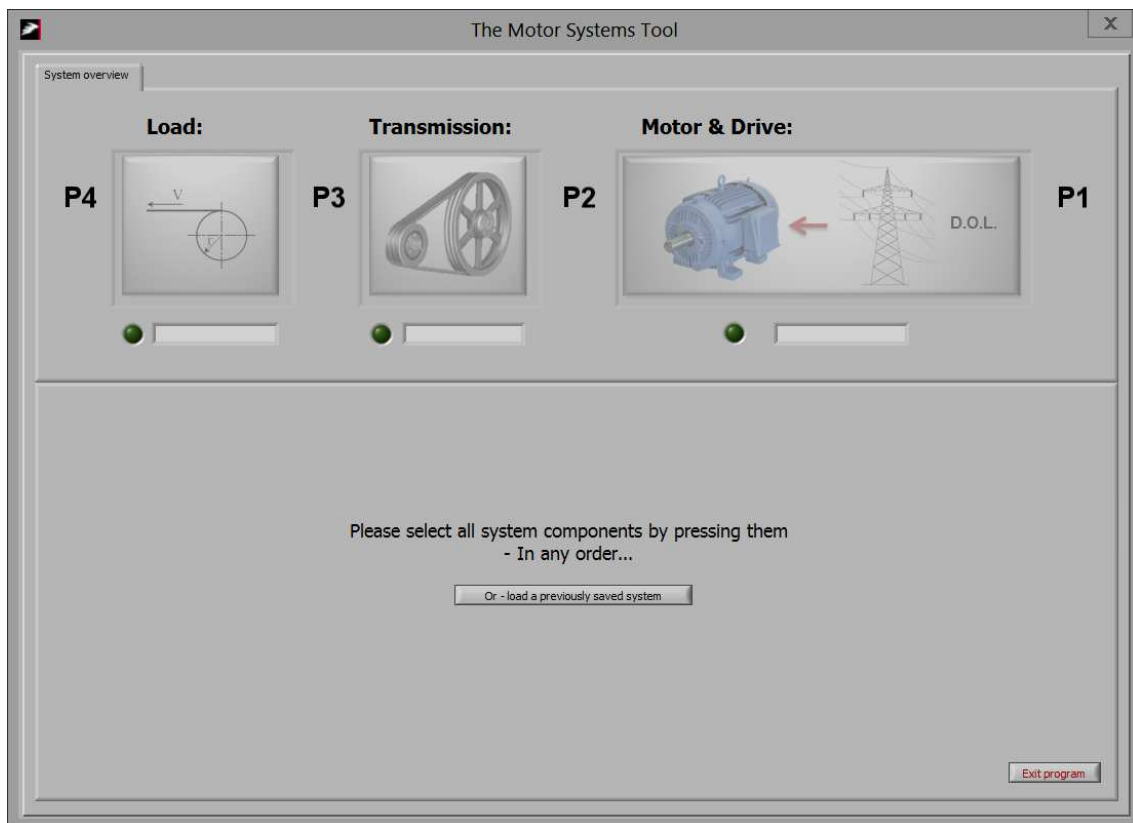


Figura 16 - Tela de escolha MST

A escolha da carga é feita entre quatro tipos, diferenciados pelas suas curvas de operação, conforme observado na Figura 17.

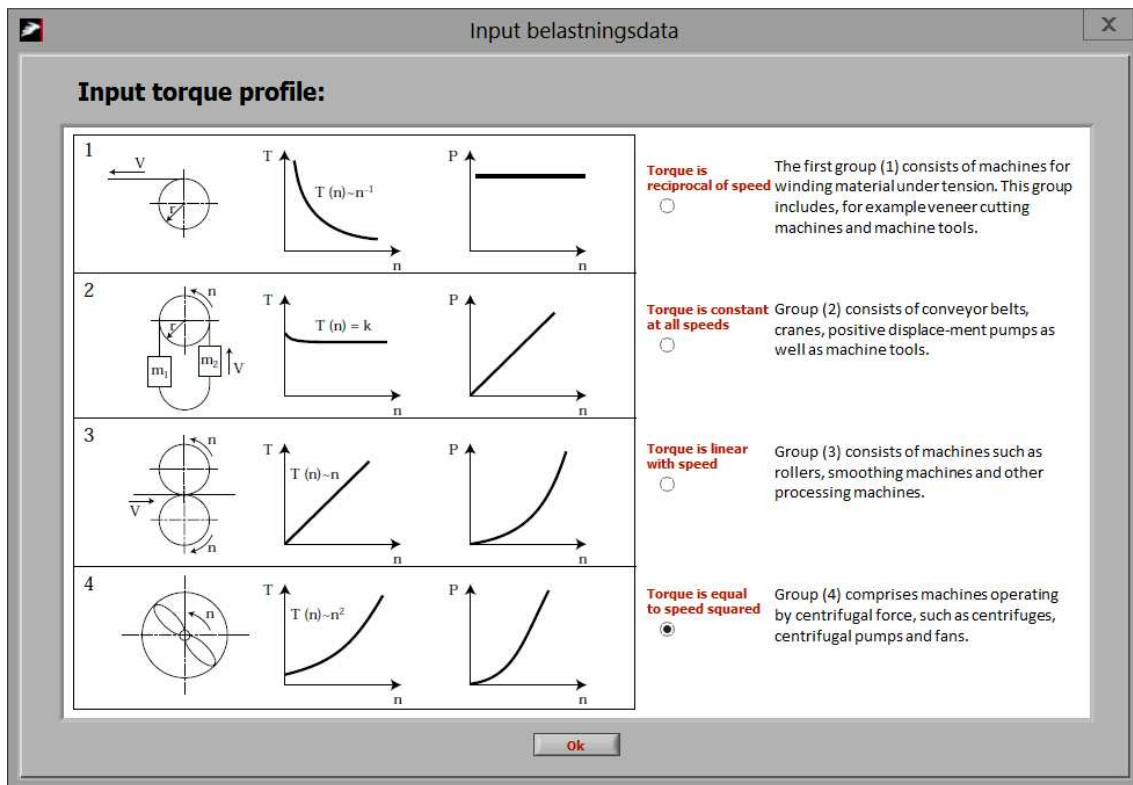


Figura 17 - Escolha da carga MST

As opções de transmissão mecânica estão entre: *correias*, *engrenagens* ou *sem transmissão mecânica*, observado na Figura 18.

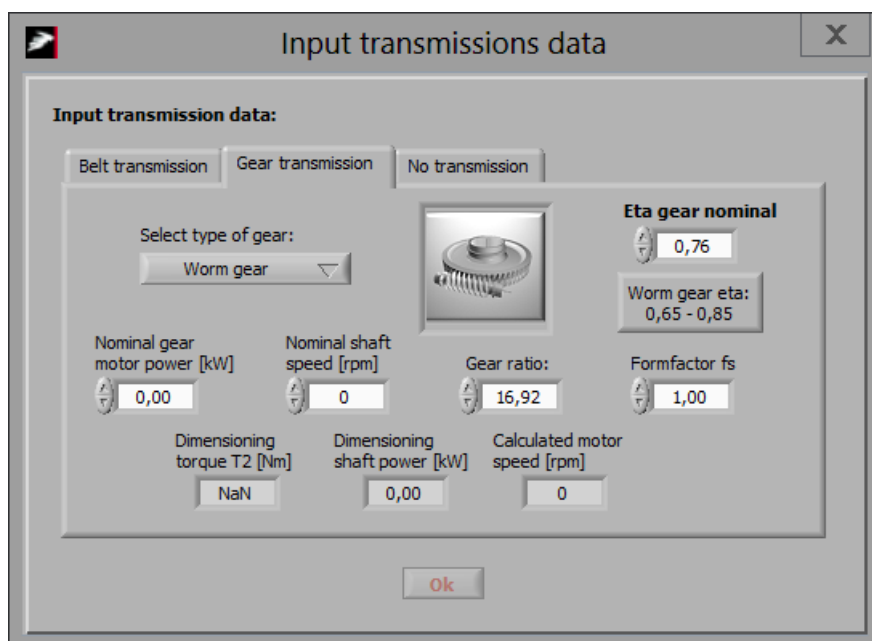


Figura 18 - Escolha de transmissão MST

Na escolha do motor elétrico há a opção da inserção de dados manualmente ou da seleção de um motor baseado na norma IEC 60034-30, onde são adotados valores médios padrões para cada classe de eficiência, conforme Figura 19.

Input motor data

Input known motor data:

Nominal shaft power: 0,75 kW

Nominal voltage: 400 Volt

Nominal current: 1,6 Ampere

Nominal cos phi: 0,84 -

Nominal frequency: 50 Hertz

Nominal speed: 1450 rpm

Torque [Nm]: 4,9 Eta [%]: 79,6 Ok? █

Load std. motor **Motordata OK**

Figura 19 - Escolha motor MST

Por fim, seleciona-se a alimentação elétrica que contempla: *ligação direta a rede*, *softstater* ou *inversor de frequência*, conforme Figura 20.

Input FOF data

Motor connection:

D.O.L. Softstarter Frequency converter

Direct On-line

Ok

Figura 20 - Escolha da alimentação MST

Com estes parâmetros definidos, determinar em qual ponto de operação será feita a simulação, onde são conhecidos os valores de operação do sistema, e estes

valores serão considerados como constantes pelo programa. Os quatro pontos de operação são:

- **P1** – Potência de entrada do motor elétrico;
- **P2** – Potência de saída do motor elétrico;
- **P3** – Potência de entrada da carga;
- **P4** – Potência de saída da carga.

Na próxima tela (Figura 21), a principal, são exibidos os valores de: *potência*, *rotação*, *rendimento* e *torque* para cada ponto e a eficiência total do sistema. Além disso, é exibido também o custo anual da operação. Os valores de eficiência são calculados a partir dos dados de entrada, porém podem ser alterados manualmente.

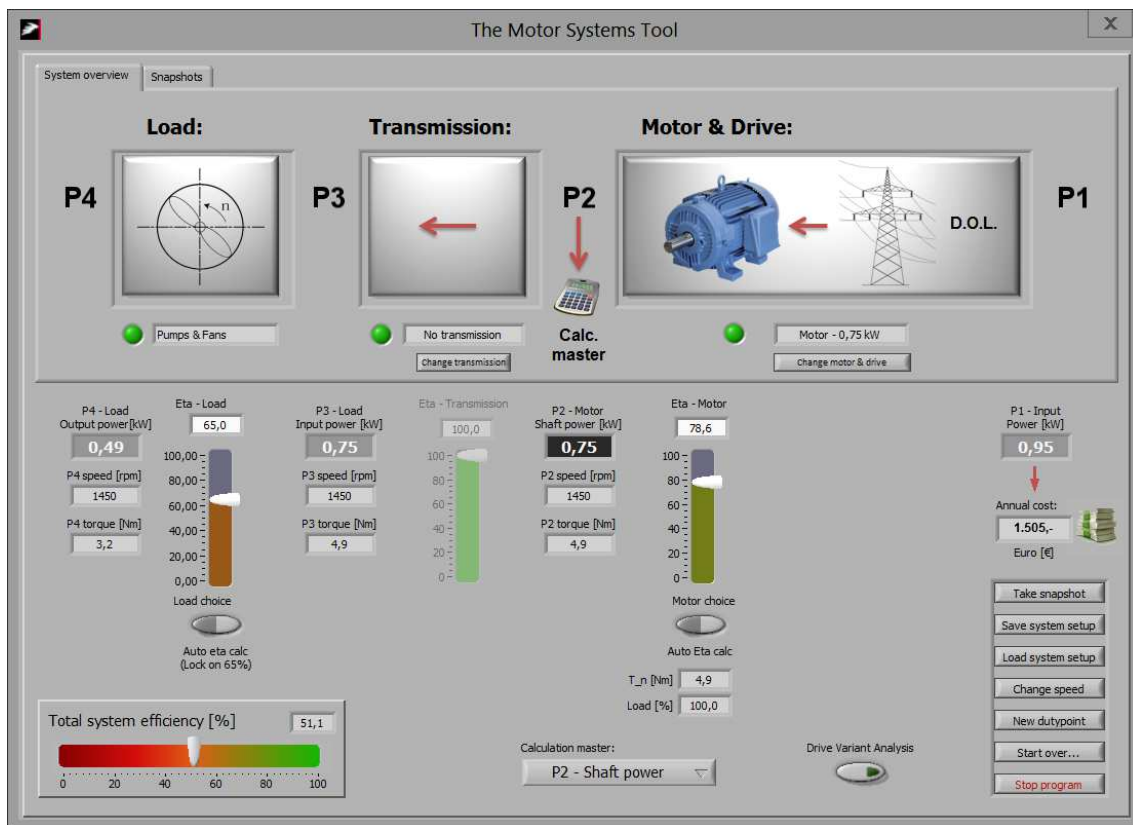


Figura 21 - Tela principal MST

Outro resultado interessante consiste na indicação da economia alcançada com outro tipo de motor elétrico para o mesmo sistema. O programa exibe uma tabela com três opções de motores abaixo e três acima da classe do motor escolhido, com a informação do custo anual de cada. Com estes dados, o usuário pode optar por um motor que atenda as necessidades do sistema, porém com um custo de operação menor. As opções aparecem na tela da Figura 22.

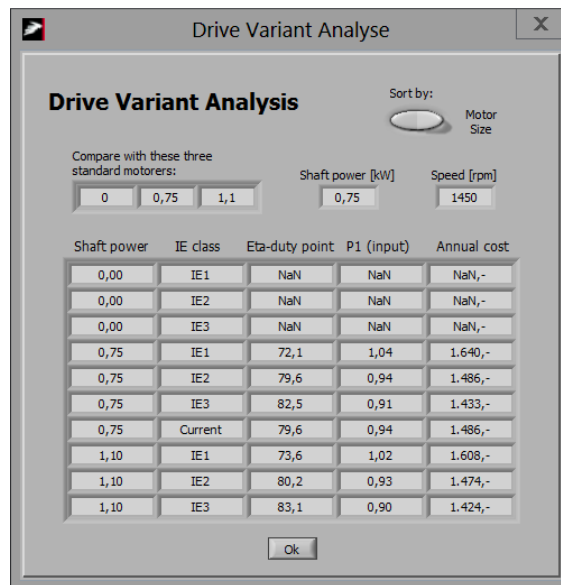


Figura 22 - Tabela de escolha do motor MST

4.3. Contexto no projeto

A grande vantagem do MST consiste em englobar na análise, todos os componentes de um sistema motriz, conseqüentemente é possível obter a eficiência total do sistema de forma simples e toda modificação feita em qualquer ponto é replicada imediatamente na interação com os outros dados, dando consistência ao resultado.

Este conceito foi apresentado à equipe do Procel, responsável pelos projetos de sistemas motrizes, a qual demonstrou grande entusiasmo, pois existe uma demanda na área de ferramentas computacionais que faça a análise do sistema de forma completa, abrangendo todas as etapas que a compõe.

O MST veio com o intuito de preencher essa demanda nos projetos de sistemas motrizes, porém foram feitas algumas observações em relação à base teórica utilizada nos cálculos, pois como não se tem acesso à estrutura do programa, não é possível identificar se segue a mesma filosofia de desenvolvimento adotado pelo Procel. Outra observação, mas não tão grave, é a utilização da norma IEC, adotado na Europa. No Brasil são utilizados os padrões NEMA.

Esta interação com o Procel, a partir da análise do conceito oferecida pelo MST, foi base da ideia inicial deste trabalho, buscando desenvolver uma ferramenta de análise completa como o MST, porém customizado para as necessidades do Procel.

5.1. Apresentação do Sistema

O conceito desta ferramenta é auxiliar o usuário na análise de eficiência, energética e econômica, em sistemas motrizes onde se deseja substituir o controle mecânico por acionamento eletrônico.

Foi concebido como projeto de graduação no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Suas funcionalidades vão ao encontro das demandas levantadas pelo Procel, nesta área de ferramentas computacionais de análise de eficiência em sistemas motrizes.

Desenvolvido em plataforma *Visual Basic for Applications* (VBA) dentro de um arquivo do *Microsoft Office Excel* e sua base de dados instanciada em um banco de dados (*DB – Data Base, em inglês*) do *Oracle, na versão Oracle Database 11g Express Edition*.

Estruturalmente, está dividido em três módulos:

- **Importação:** onde o usuário pode inserir novos dados ou alterar dados já existentes no banco de dados do programa.
- **Cálculo:** módulo no qual são realizados todos os cálculos pertinentes e retornam os resultados ao usuário.
- **Configurações:** módulo onde é possível ocultar ou tornar visível a planilha Excel do arquivo.

Atualmente o programa está na versão v1.0b e contempla apenas sistemas de bombeamento, especificamente, bombas centrífugas com as pás viradas para trás. Funciona no idioma Português (brasileiro) e sua licença é gratuita. A Figura 23 mostra a tela de abertura do programa e a Figura 24 a tela inicial de seleção dos módulos.



Figura 23 - Tela de abertura – PAN MotorSYS

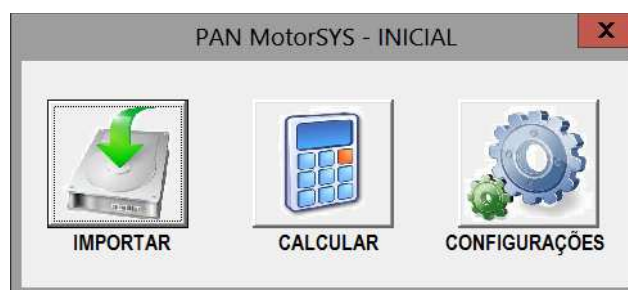


Figura 24 - Tela inicial – PAN MotorSYS

5.2. Banco de Dados

O banco de dados adotado para este programa foi o *Oracle Database 11g Express Edition*, que é uma versão gratuita fornecida pela *Oracle Corporation*.

A instalação e configuração correta do banco são essenciais para o correto funcionamento da ferramenta. O intuito ao adotar um banco de dados, e não utilizar apenas as planilhas do arquivo Excel, é de tornar os dados acessíveis e coerentes a todos os usuários, pois eles estarão conectados no mesmo banco e a alteração realizada por um será propagada a todos.

Faz-se necessário a escolha de um computador que funcionará como servidor do banco de dados, e o *Oracle Database 11g Express Edition* deverá ser instalado nele. Nas outras máquinas de usuários deverá ser instalado o **client** do Oracle,

ferramenta de conexão com o servidor. A base de dados e o programa podem ser utilizados em um mesmo computador.

Este banco de dados segue o modelo Relacional, um conceito abstrato onde se define maneiras de armazenar, manipular e recuperar dados estruturados unicamente na forma de tabelas. Todos os dados de um banco de dados relacional (BDR) são armazenados em tabelas, simples estrutura de linhas e colunas. Em uma tabela, cada linha contém um mesmo conjunto de colunas. Em um banco de dados podem existir uma ou centenas de tabelas, sendo que o limite pode ser imposto tanto pela ferramenta de *software* utilizada, quanto pelo recurso de hardware disponível no equipamento. As tabelas associam-se entre si através de regras de relacionamentos e estas regras consistem em associar um ou vários atributo de uma tabela com um ou vários atributos de outra tabela.

Nesta versão do PAN MotorSYS foram criadas duas tabelas independentes, ou seja, não existe relacionamento em nenhum nível entre elas:

- **PJ_FLUIDO:** contém as informações de tipo de fluido e sua densidade dada na unidade de kg/m³.
- **PJ_MOTOR:** tabela onde são alocadas as informações de motores elétricos. Dados que podem ser cadastrados: ***Fabricante, Potência Nominal, Unidade da Potência Nominal, Rotação Nominal, Unidade da Rotação Nominal, Rendimento para um Carregamento de 50%, Rendimento para um Carregamento de 75% e Rendimento para um Carregamento de 100%.***

Foram importados os dados de motores a partir do programa BD Motor, por possuir uma base bastante completa e que já vem sendo utilizado pelo Procel.

5.3. Módulo: Importar

Apenas neste módulo o usuário pode inserir ou alterar informações do banco de dados. Para acessá-lo basta clicar sobre o ícone ***Importar*** na tela inicial do programa (Figura 24), o que levará a tela da Figura 25.

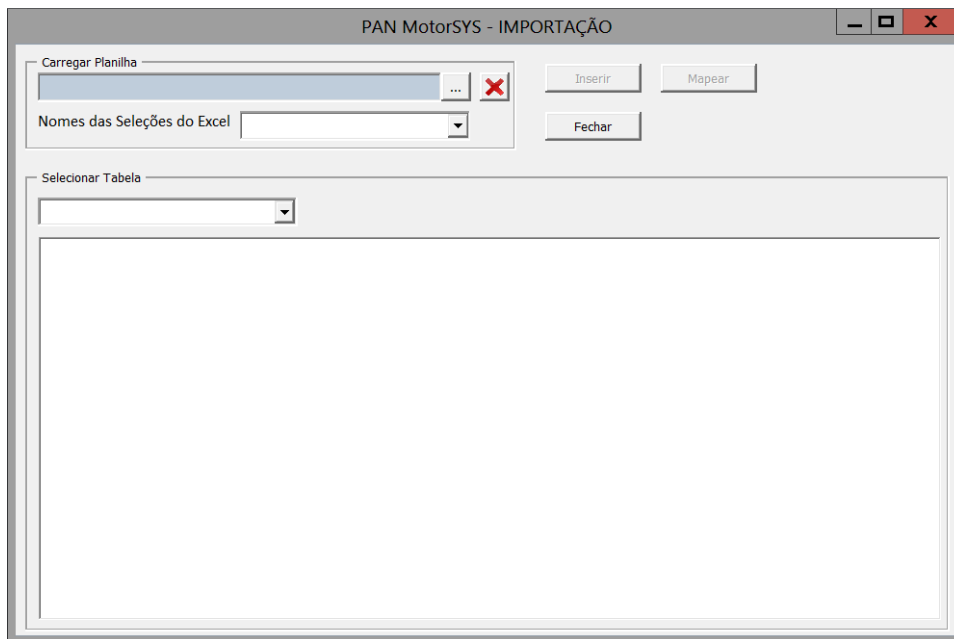


Figura 25 - Tela de importação – PAN MotorSYS

A importação ou alteração de dados é feita através de uma planilha Excel externa, que deverá ser informada ao programa, assim como o nome da tabela do banco o qual se deseja acessar.

Para que o programa reconheça os campos da planilha Excel, o usuário precisa selecionar nela a área onde estão os dados a serem utilizados e definir um nome para esta seleção, conforme Figura 26. A seleção deve englobar os cabeçalhos das colunas.

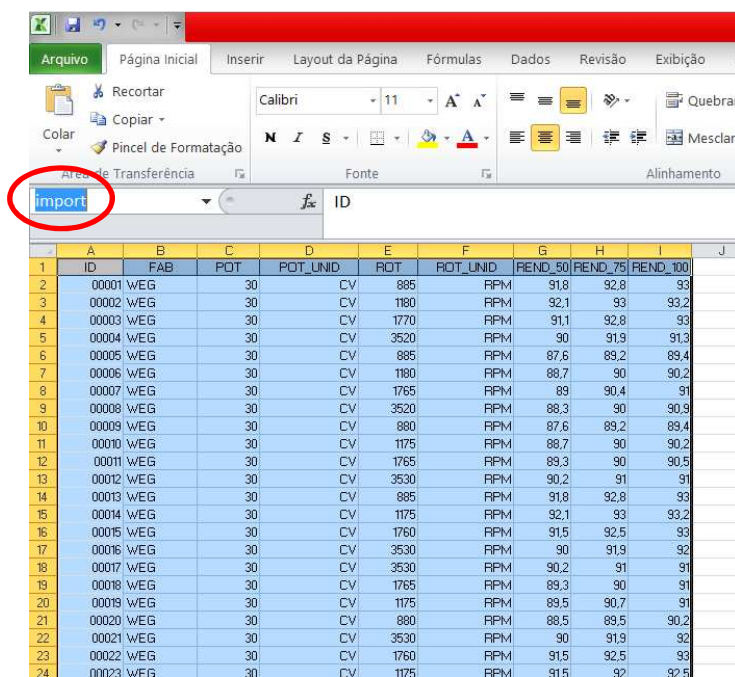


Figura 26 - Definir área a ser importada – planilha Excel

Para carregar esta planilha Excel basta clicar no botão indicado na Figura 27 e selecionar o arquivo desejado, como ilustrado a Figura 28.

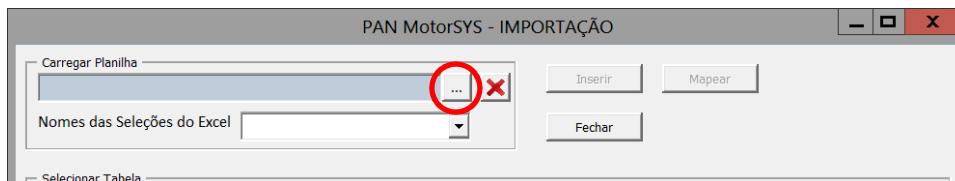


Figura 27 - Seleção do arquivo de importação – PAN MotorSYS

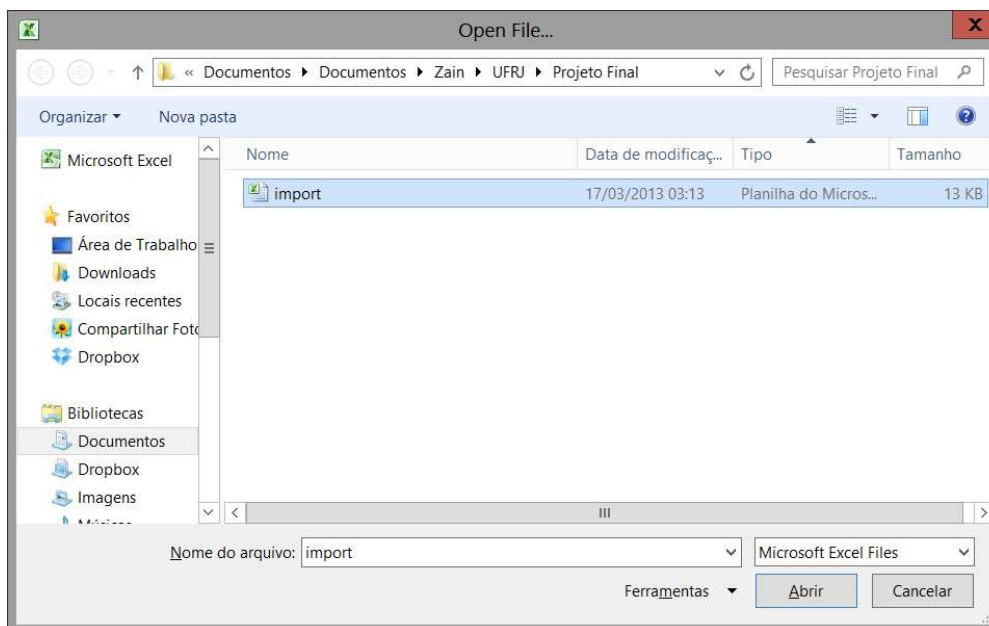


Figura 28 - Seleção do arquivo de importação – PAN MotorSYS

Após selecionar o arquivo, o campo **Nome das Seleções do Excel** irá listar todos os nomes de seleções que foram definidos naquele arquivo, e basta escolher o qual se deseja importar, conforme Figura 29.

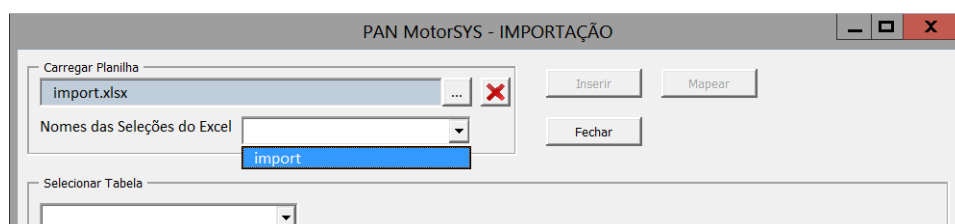


Figura 29 - Lista de nomes de seleção – PAN MotorSYS

Uma grande vantagem ao utilizar a definição de nomes é de poder criar diversas seleções dentro de um mesmo arquivo Excel e realizar a importação para vários casos apontando apenas um único arquivo.

No próximo passo, indicar ao programa em qual tabela do DB deseja-se importar ou alterar os dados, isto na caixa de seleção **Selecionar Tabela**, conforme

Figura 30. Esta seleção não precisa ser feita, obrigatoriamente, depois de carregar o arquivo Excel de importação. Pode-se fazer primeiro a seleção da tabela do banco e depois o carregamento do arquivo. A Figura 31 mostra a tela com os dados preenchidos.

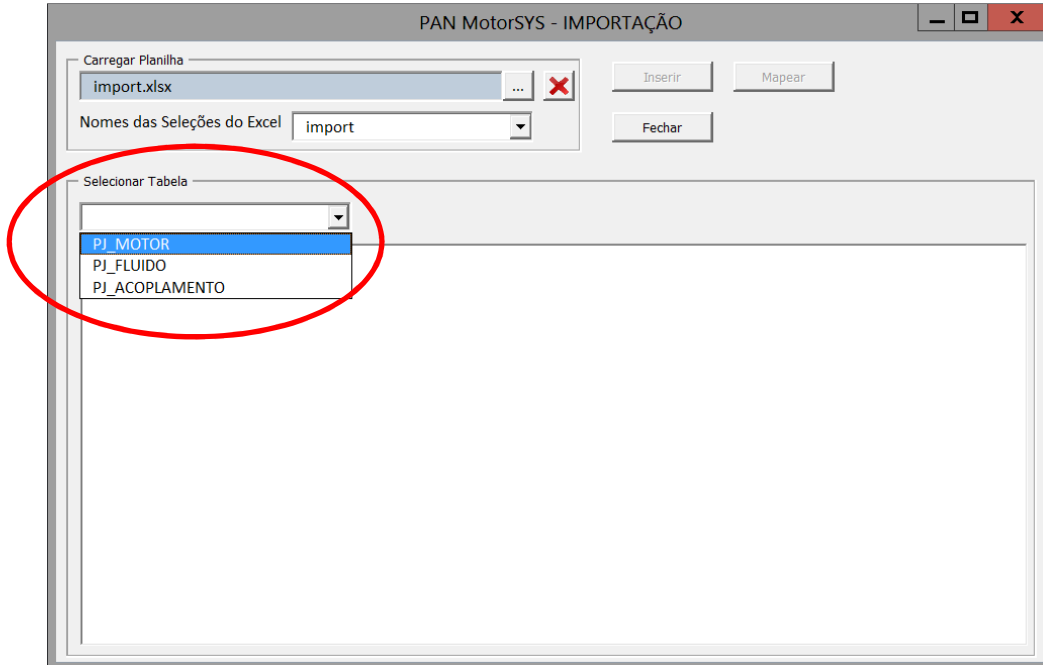


Figura 30 - Seleção da tabela do banco para importação – PAN MotorSYS

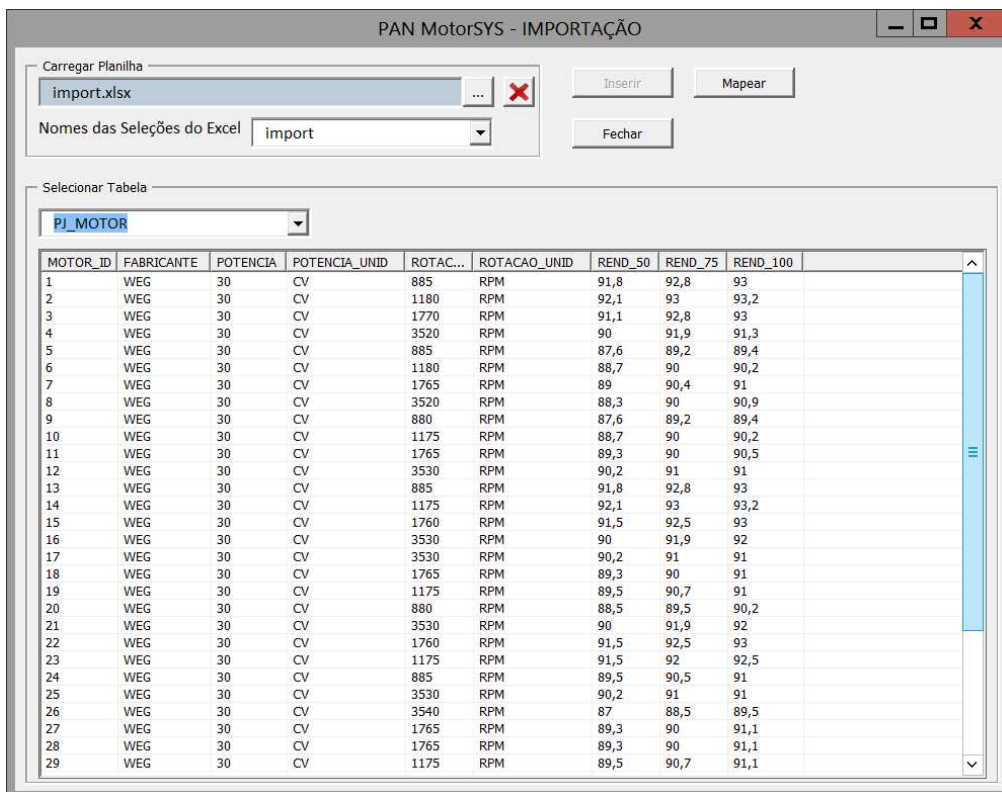


Figura 31 - Tela de importação preenchida – PAN MotorSYS

Ao selecionar uma das tabelas na caixa de seleção, são listados, automaticamente, todos os dados daquela tabela, que estão registrados no DB.

Com estes campos preenchidos, o programa habilita o botão **Mapear**, e ao clicar sobre ele, aparecerá a tela da Figura 32.

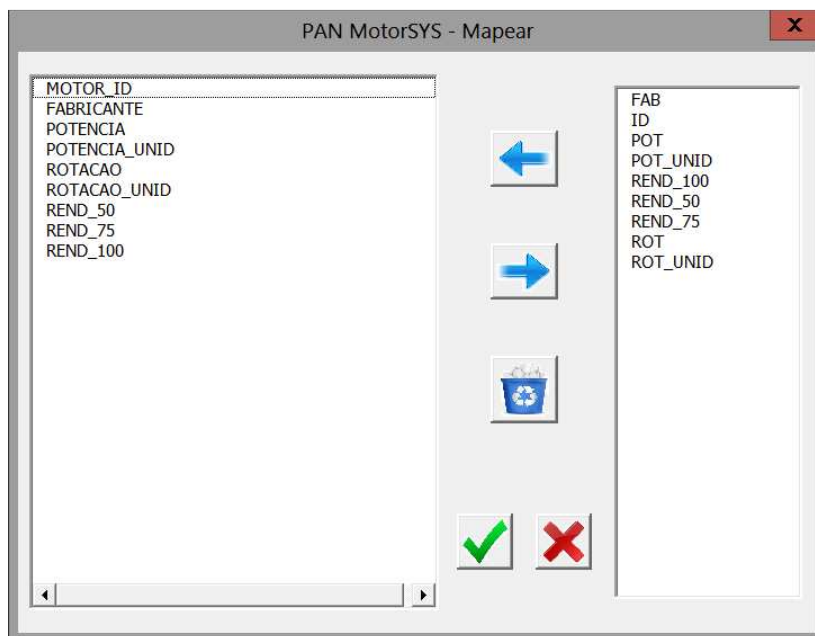



Figura 32 - Tela para mapear os campos de importação – PAN MotorSYS

Nesta tela, o usuário deve relacionar no programa as colunas do arquivo Excel a serem importadas para cada coluna da tabela do DB. A lista da esquerda é a de nomes das colunas da tabela do DB e a da direita dos cabeçalhos das colunas da seleção do arquivo Excel associado na tela anterior.

Para realizar o mapeamento, basta selecionar um item de cada lado e clicar na seta apontada para esquerda . No exemplo da Figura 33, pelo mapeamento feito, deseja-se importar os dados que estão na coluna **ID** do arquivo Excel para a coluna **MOTOR_ID** da tabela do DB e a coluna **FAB** para coluna **FABRICANTE**.

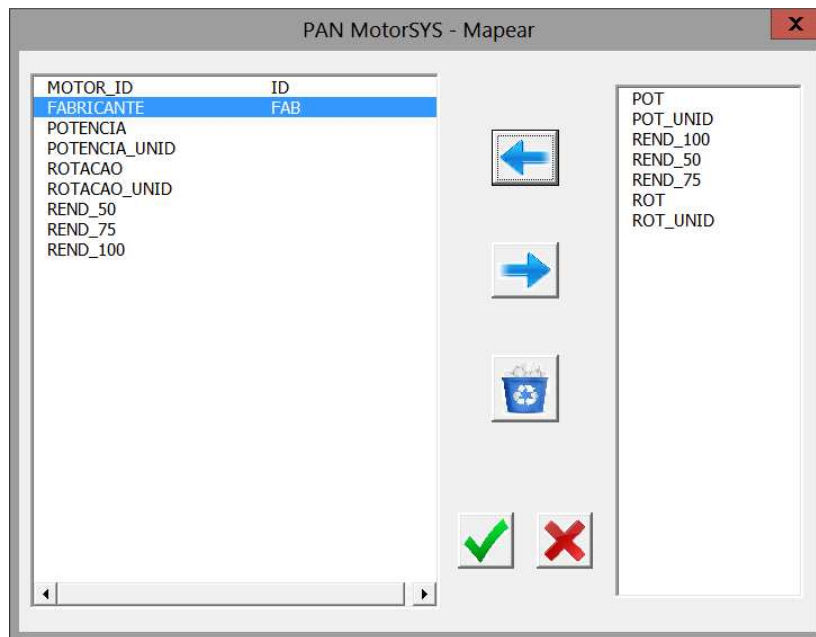



Figura 33 - Tela para mapear os campos de importação – PAN MotorSYS

Obrigatório mapear, pelo menos, o primeiro item da lista da esquerda, que no caso da Figura 32 é o ***Motor_ID***. O primeiro item da lista é a chave primária de cada tabela e através dela o programa faz a busca no DB. Se no banco já existir um item com o mesmo valor de chave primária da que está sendo usado na busca, o programa apenas atualiza as informações deste item. Porém, se não for encontrado nenhum item com aquela chave, é criado um item novo. Caso ela não seja mapeada, ao tentar salvar, clicando no botão , aparecerá uma mensagem de aviso, conforme Figura 34.

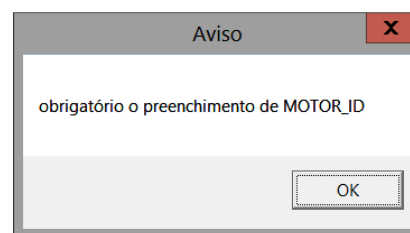








Figura 34 - Mensagem de aviso ao mapear – PAN MotorSYS

O botão com a seta apontada para direita  desassocia as colunas mapeadas. Para desassociar basta selecionar um item da lista de esquerda que já tenha sido mapeada e clicar no botão , com isso, o item que representa a coluna do arquivo Excel retorna para a lista da direita. Observando o exemplo da Figura 33, se selecionado o item ***FABRICANTE***, na lista da esquerda, que já havia sido mapeado com o item ***FAB***, e clicar na seta apontada para direita , o item ***FAB*** voltará para a lista da direita, liberando o item ***FABRICANTE*** para uma nova associação.

O botão com o símbolo de lixeira  limpa todas as associações já realizadas, voltando ao estado inicial. O botão  fecha a tela sem salvar as alterações realizadas, já o botão  salva e fecha a tela.

Uma vez mapeado as colunas, o botão **Inserir** é habilitado. Ao clicar nele, o programa, de fato, executa a inserção ou atualização de dados. A exibição na tela é atualizada automaticamente.

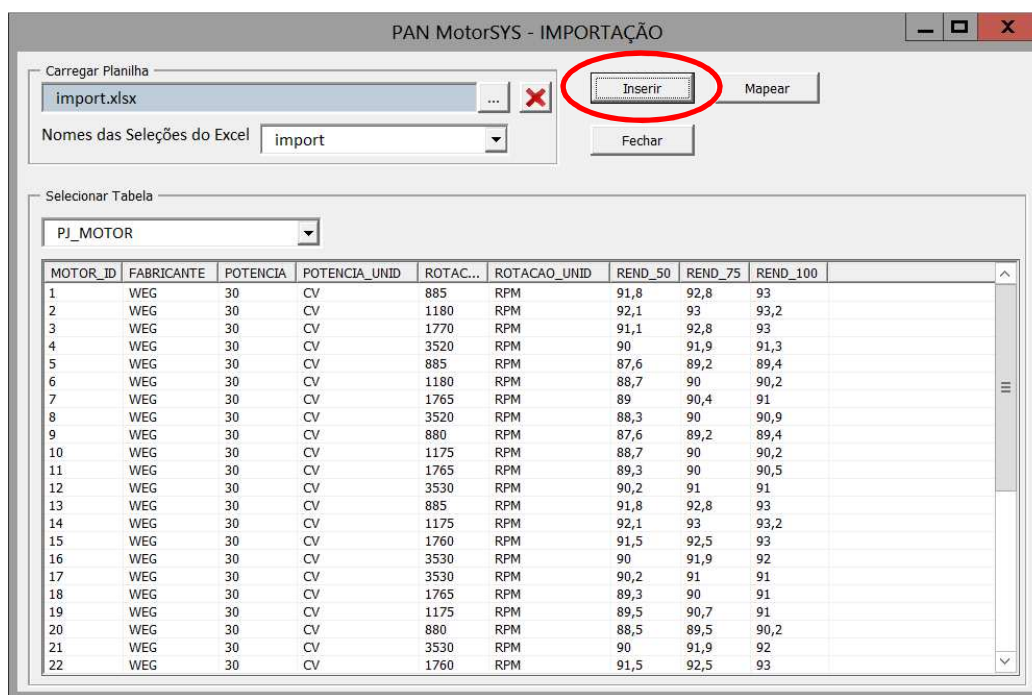


Figura 35 - Tela de importação (antes) – PAN MotorSYS

A Figura 35 representa o estado antes de se pressionar o botão **Inserir**. Neste exemplo, o valor da coluna **Unidade de Potência** foi alterado no arquivo Excel e esta coluna foi mapeada para importação. Ao clicar no botão **Inserir**, os valores da coluna **POTENCIA_UNID**, exibidas na tela são, automaticamente, alteradas de **cv** para **hp**, como visto na Figura 36.

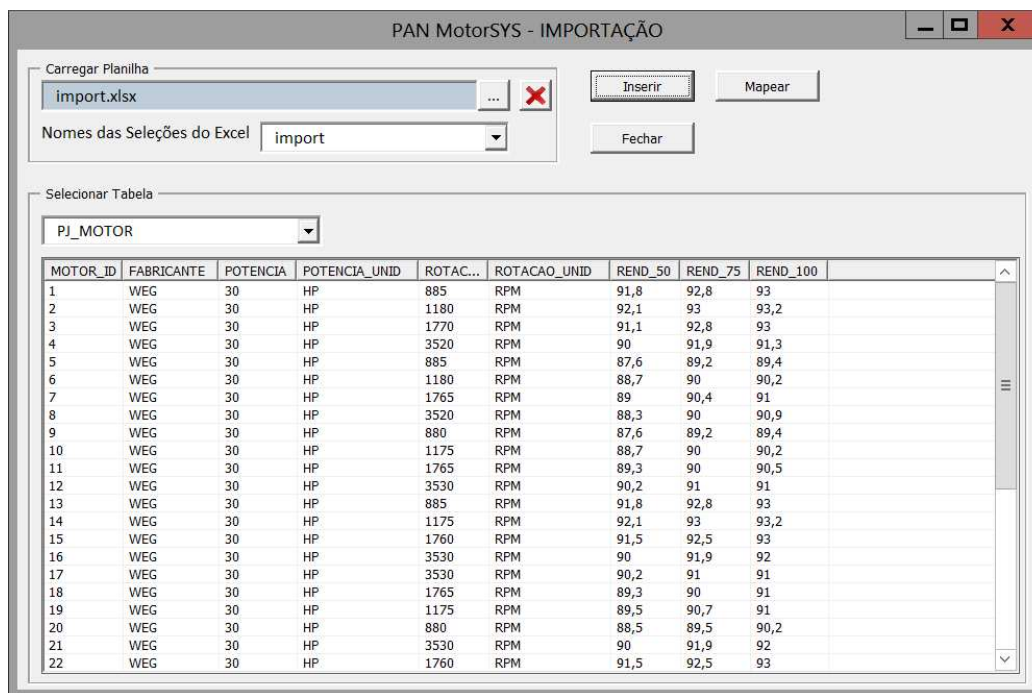


Figura 36 - Tela de importação (depois) – PAN MotorSYS

Ao finalizar todos os procedimentos de inserção ou alteração dos dados, basta clicar no botão **Fechar** e o programa retornará a tela inicial.

5.4. Módulo: Calcular

Principal módulo, onde são inseridos os dados do sistema a serem analisados, realizando os cálculos e interações, e por fim retorna o resultado.

Ele está organizado em 4 abas: **CARGA**, **ACOPLAMENTO**, **MOTOR** e **CÁLCULO**.

5.4.1 Carga

Nesta aba é selecionado o tipo do sistema, em função da carga a ser acionada. Na atual versão apenas a opção de bombas está configurada. Existe a aba de ventiladores, porém de forma meramente ilustrativa nesta versão, indicando a possibilidade de se adicionar novas opções apenas criando, futuramente, outras abas. A Figura 37 exemplifica esta tela.

Figura 37 - Tela de seleção da carga – PAN MotorSYS

Os campos de entrada de dados na parte superior da tela são informações básicas para do sistema que devem ser inseridas pelo usuário. Os únicos dois campos que estão bloqueados são as de **Altura Estática** e **Densidade**.

- **Altura Estática:** Calculado automaticamente. A altura estática de um sistema de bombeamento é resultado da soma de duas parcelas: *altura geométrica* e *perdas de carga*. A altura geométrica é a diferença entre a **Altura Estática de Aspiração** e a **Altura Estática de Recalque**, já as perdas de carga é resultado da diferença de carga entre a **Pressão no Reservatório de Recalque** e a **Pressão no Reservatório de Aspiração**.
[12]
- **Densidade:** Preenchido automaticamente ao selecionar o fluido. As informações do tipo de fluido e sua respectiva densidade devem ser importadas para o banco de dados, seguindo o procedimento na seção 5.3. A seleção é feita conforme a Figura 38.

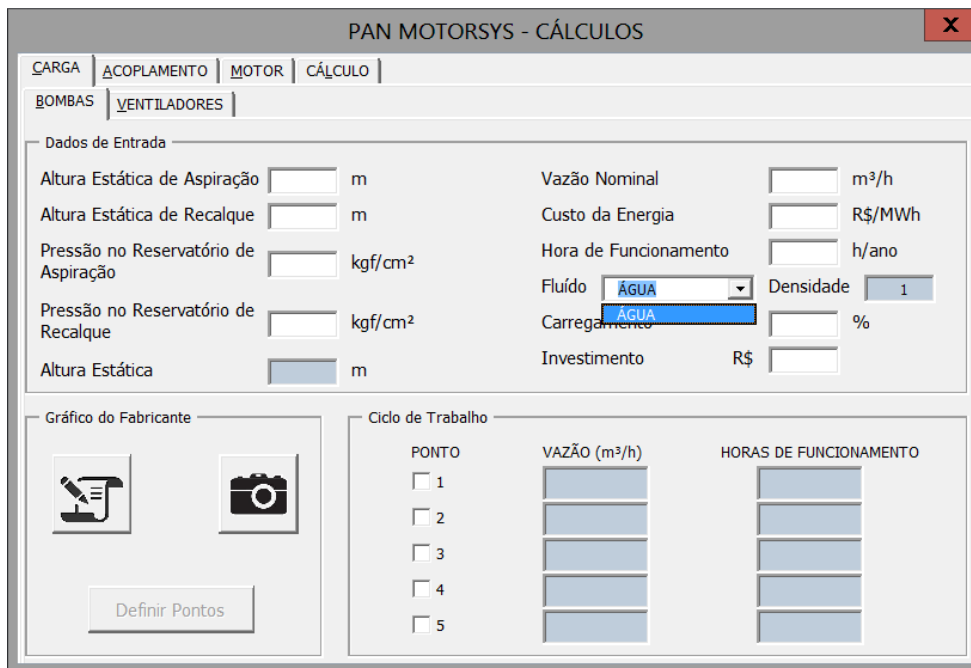


Figura 38 - Seleção de fluido – PAN MotorSYS

A Figura 39 mostra a tela de carga com os dados de entrada preenchidos.

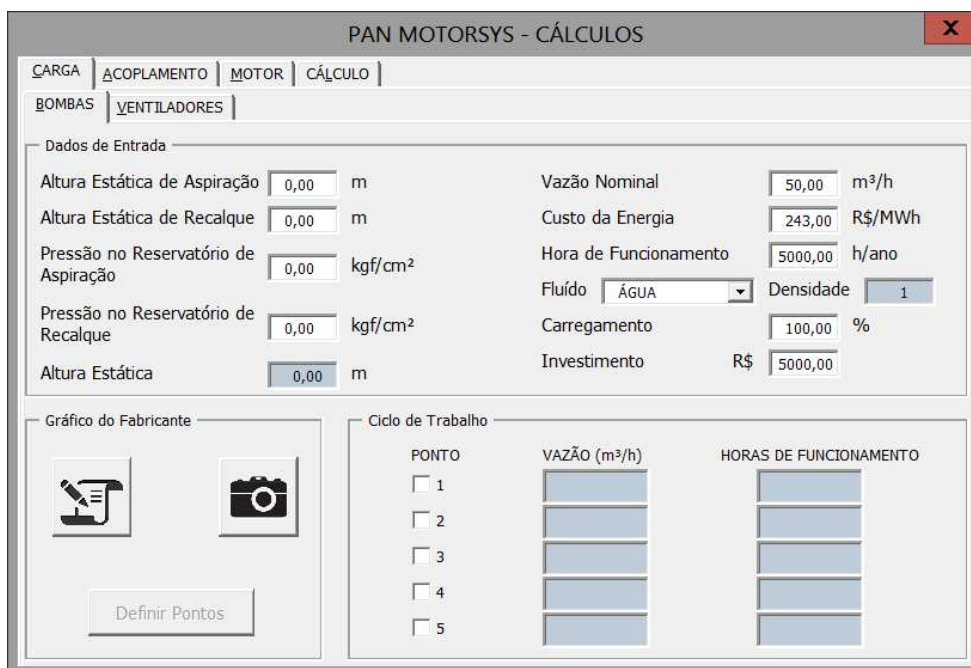


Figura 39 - Tela de seleção da carga – PAN MotorSYS

Na área de **Gráfico do Fabricante** existem dois ícones e o botão **Definir Pontos**. O gráfico da bomba fornecido pelo fabricante possui os eixos **Vazão x Altura Manométrica**. A Figura 40 traz um exemplo deste gráfico.

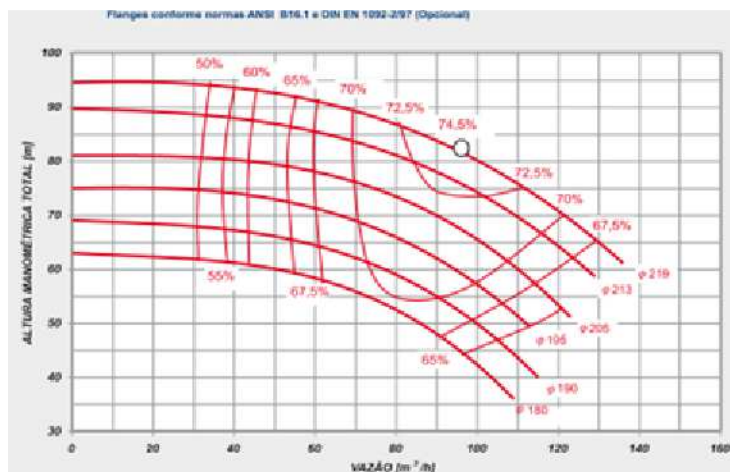



Figura 40 - Gráfico da bomba pelo fabricante

Ao selecionar o ícone da esquerda , e clicar no botão **Definir Pontos**, aparecerá uma tela (Figura 41), para preenchimento manual dos pontos do gráfico. Além do valor da vazão e altura manométrica, o usuário precisa informar também o rendimento da bomba, na rotação nominal, em cada um destes pontos. Normalmente estas informações são obtidas visualmente através do gráfico fornecido pelo fabricante.


PAN MotorSYS - GRÁFICO FABRICANTE MANUAL

Dados

PONTOS	X (VAZÃO)	Y (PRESSÃO)	RENDIMENTO (%)
1	0,00	75	0
2	37	74	55
3	55	72,5	65
4	60	71	68
5	70	69	70
6	100	57	70
7	110	54	67
8			
9			
10			

Ok Fechar Limpar

Figura 41 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (manual) – PAN MotorSYS

Ao marcarem o ícone da direita  e clicar em **Definir Pontos**, surgirá outra tela (Figura 42), onde os pontos da curva podem ser obtidos ao se clicar sobre eles na imagem de um gráfico.

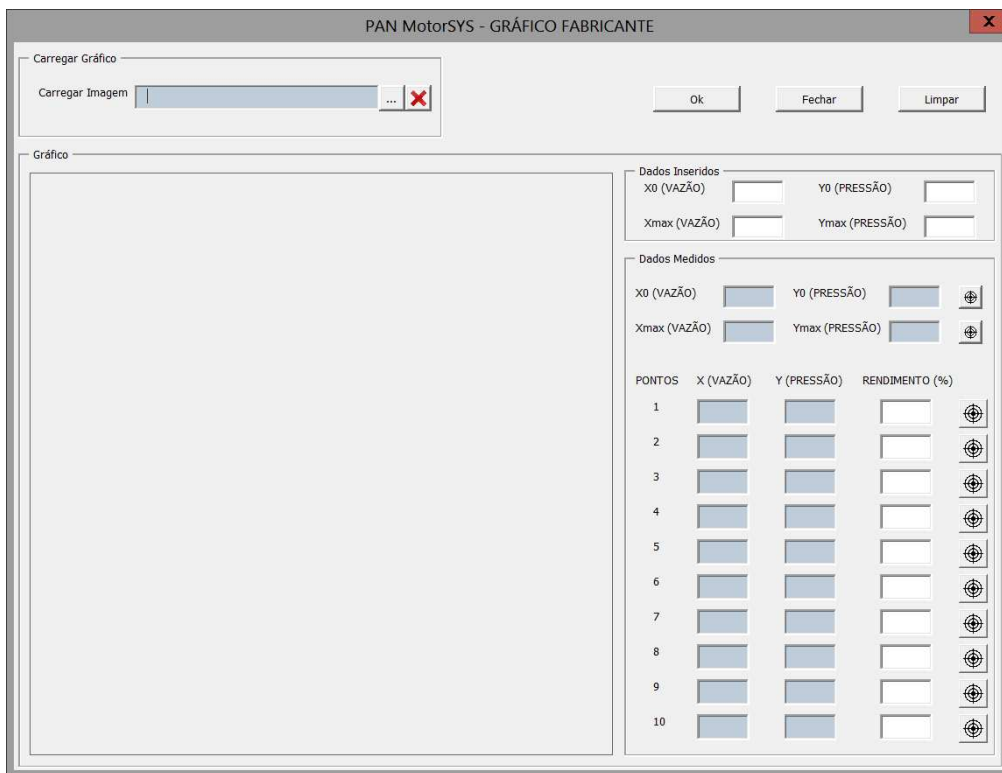


Figura 42 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (imagem) – PAN MotorSYS

Usualmente, os gráficos utilizados para a análise são arquivos de imagem (ex: .jpg, .gif, etc.), o que dificulta imensamente ao profissional coletar os valores exatos, forçando-o a estimar, de forma bem aproximada, estes dados.

Nesta opção, o programa oferece a possibilidade de carregar esta imagem, para tanto, basta clicar no botão destacado na Figura 43 e abri-lo. A imagem será exibida na área logo abaixo, como apresentado na Figura 44.

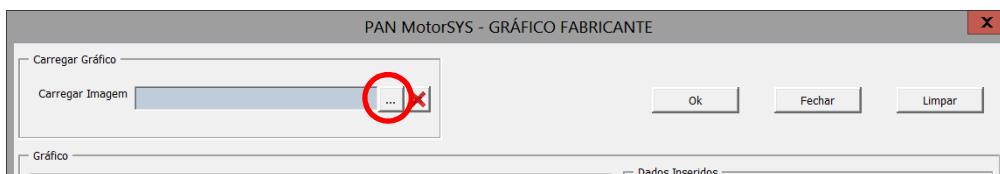


Figura 43 - Carregar gráfico do fabricante – PAN MotorSYS

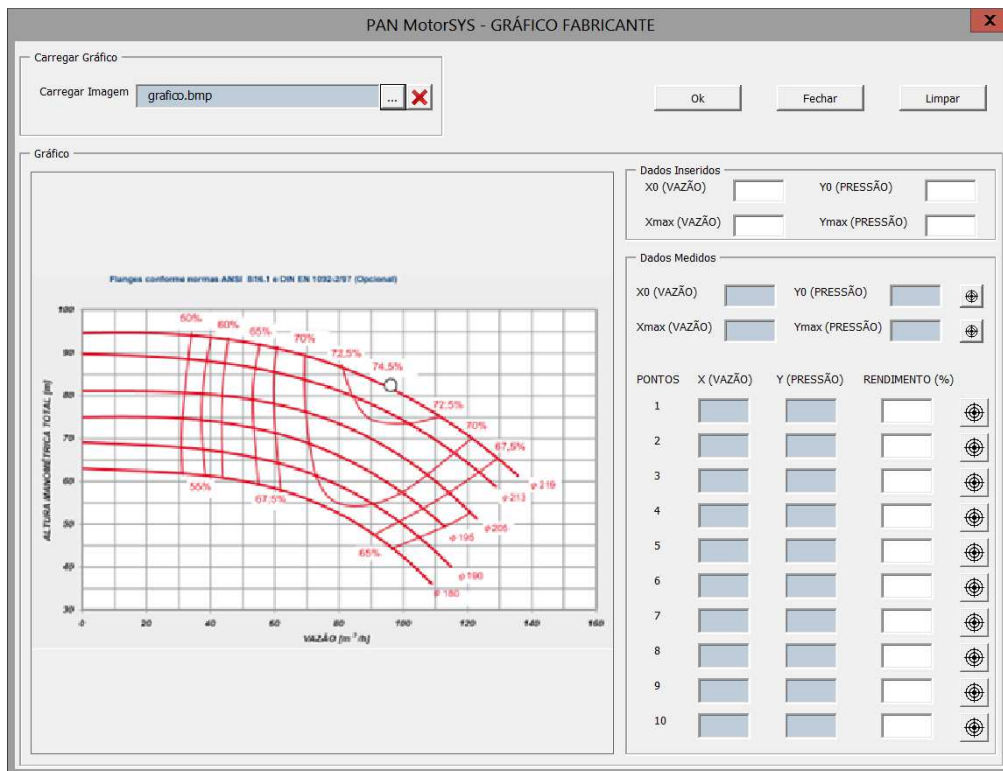



Figura 44 - Tela para os pontos do gráfico da bomba (imagem) – PAN MotorSYS

Os quatro campos na parte superior e direita da tela da Figura 44, dentro da área **Dados Inseridos**, precisam ser preenchidos para que se possa realizar a coleta dos pontos. Os campos **X0** e **Y0** devem ser preenchidos com os valores iniciais de vazão e pressão (altura manométrica), respectivamente, da curva selecionada. No caso da Figura 44, o valor inicial do eixo X (vazão) é igual a 0 e o do eixo Y (altura manométrica) igual a 30. Os outros dois campos **Xmax** e **Ymax** são para os valores máximos dos eixos no gráfico, que pela Figura 44 são 160 e 100, respectivamente.

O passo seguinte será informar ao programa a posição destes dois pontos, inicia e final. Para indicar a posição dos pontos iniciais do gráfico, deve-se clicar no botão , localizado ao lado dos campos **X0 (VAZÃO)** e **Y0 (PRESSÃO)**, dentro da área **Dados Medidos**, e depois clicar no desenho a localização do ponto. Ao fazer isso, esta posição ficará marcada no gráfico, indicando a origem, conforme Figura 45.

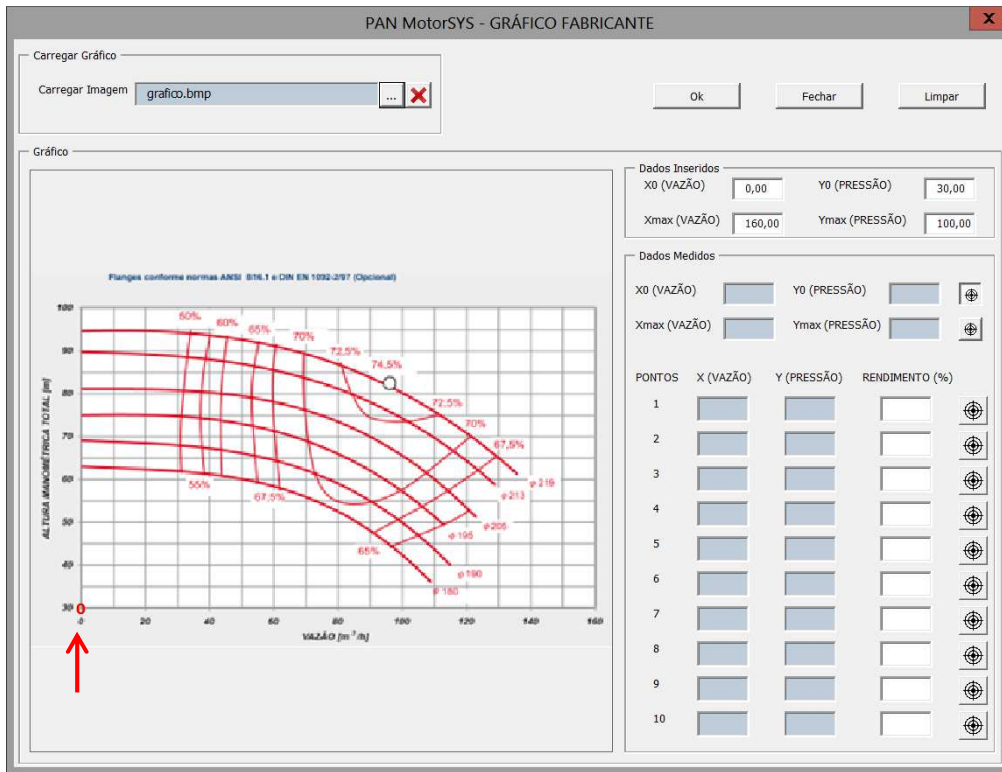


Figura 45 - Definição do ponto de origem do gráfico – PAN MotorSYS

46. Deve-se repetir este processo para o ponto de **Xmax** e **Ymax**, conforme Figura

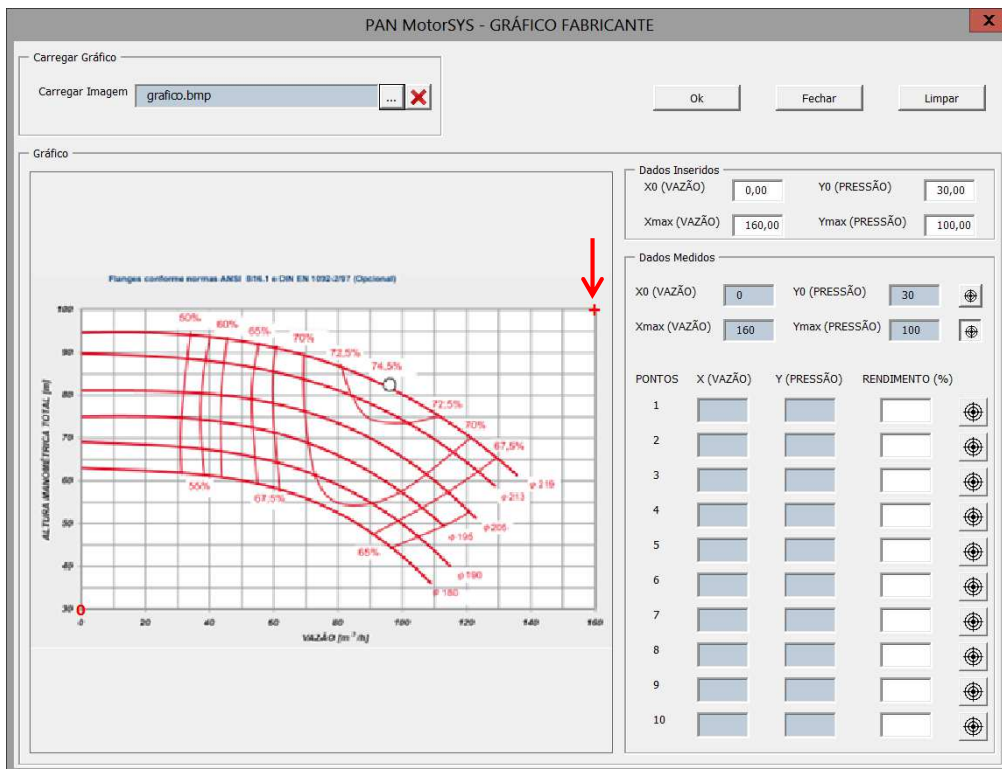



Figura 46 - Definição do ponto máximo do gráfico – PAN MotorSYS

Com estes dados fornecidos, o programa será capaz de coletar os valores da curva. Pode-se coletar até 10 pontos, bastando clicar no botão  ao lado da linha de cada ponto e clicar na posição desejada sobre a curva, conforme Figura 47.

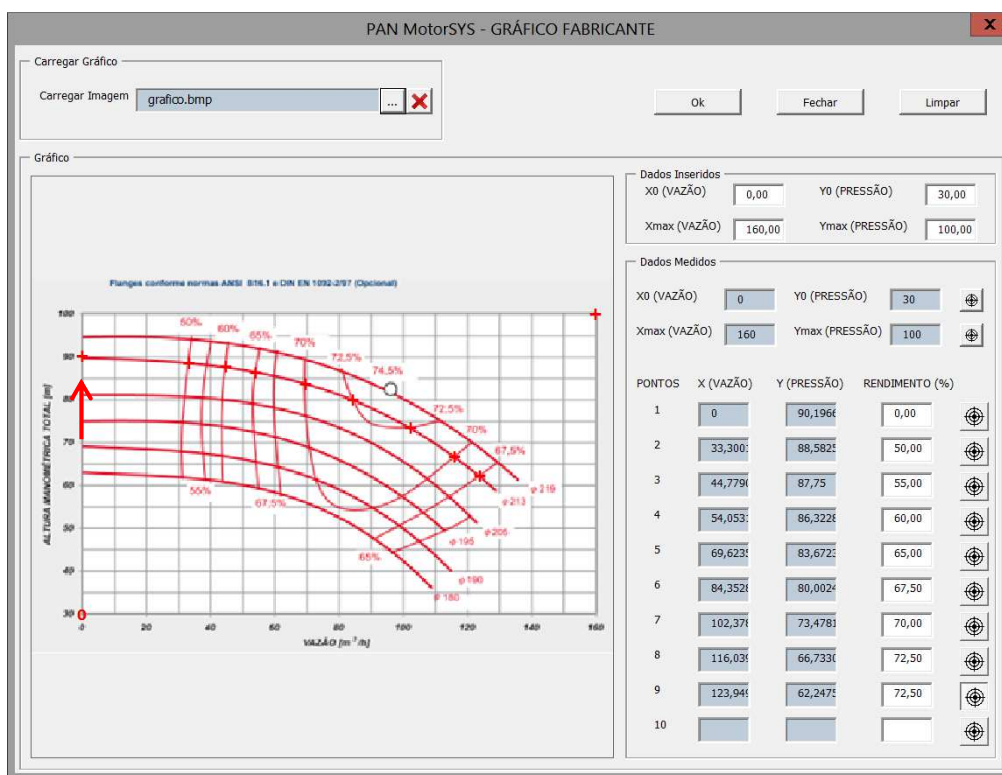


Figura 47 - Pontos da curva do gráfico do fabricante – PAN MotorSYS

Será necessário o preenchimento manual dos valores de rendimento, na rotação nominal, para cada um destes pontos selecionados. Ao clicar em **Ok**, o programa retornará a tela anterior.

Uma das opções de coleta de pontos do gráfico do fabricante precisa ser selecionada (Figura 48), seja a de entradas manuais ou pela imagem do gráfico.



Figura 48 - Modo de entrada de dados do gráfico do fabricante

A última área desta tela, **Ciclo de Trabalho**, destina-se a informação do ciclo de operação do sistema, que no caso de bombas, são as informações de vazão e o período em que o sistema irá operar com este valor de vazão, em horas. A Figura 49 mostra este campo preenchido com dois ciclos de trabalho diferentes.

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | **ACOPLAMENTO** | MOTOR | CÁLCULO

BOMBAS | **VENTILADORES**

Dados de Entrada

Altura Estática de Aspiração	<input type="text" value="0,00"/>	m	Vazão Nominal	<input type="text" value="50,00"/>	m³/h
Altura Estática de Recalque	<input type="text" value="0,00"/>	m	Custo da Energia	<input type="text" value="243,00"/>	R\$/MWh
Pressão no Reservatório de Aspiração	<input type="text" value="0,00"/>	kgf/cm²	Hora de Funcionamento	<input type="text" value="5000,00"/>	h/ano
Pressão no Reservatório de Recalque	<input type="text" value="0,00"/>	kgf/cm²	Fluído	<input type="text" value="ÁGUA"/>	Densidade <input type="text" value="1"/>
Altura Estática	<input type="text" value="0,00"/>	m	Carregamento	<input type="text" value="100,00"/>	%
			Investimento	R\$ <input type="text" value="5000,00"/>	

Gráfico do Fabricante

Ciclo de Trabalho

PONTO	VAZÃO (m³/h)	HORAS DE FUNCIONAMENTO
<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="text" value="50,00"/>	<input type="text" value="2500,00"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="text" value="20,00"/>	<input type="text" value="2500,00"/>
<input type="checkbox"/> 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Definir Pontos

Figura 49 - Ciclo de trabalho – PAN MotorSYS

5.4.2 Acoplamento

Nesta aba (Figura 50) será definido o valor de rendimento do acoplamento mecânico utilizado no sistema a ser estudado. Apenas o acoplamento direto está configurado, porém, da mesma forma que na aba de cargas, novas opções de cálculos de acoplamentos são facilmente adicionadas ao programa, bastando criar novas abas para elas.

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | **ACOPLAMENTO** | MOTOR | CÁLCULO

DIRETO | ENGRENAGENS | CORREIAS

Dados de Rendimento

Manual

Rendimento

Medição

Frequência Nominal Hz

Torque (Entrada) Nm Torque (Saída) Nm

Rotação (Entrada) RPM Rotação (Saída) RPM

Potência (Entrada) W Potência (Saída) W

Rendimento %

Figura 50 - Tela de seleção de acoplamento – PAN MotorSYS

Existem duas opções para o valor do rendimento do acoplamento: **Manual** ou **Medição**. Ao selecionar a opção de **Manual**, conforme Figura 51, basta fornecer diretamente o valor do rendimento no campo que se habilitará.

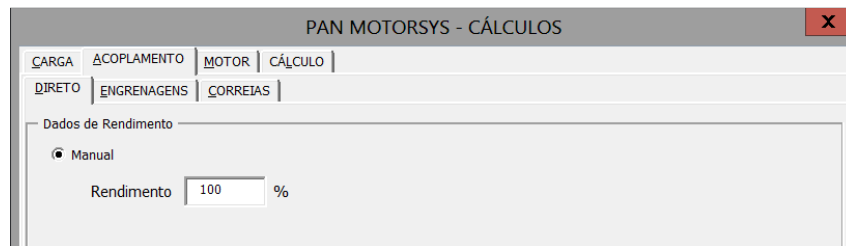


Figura 51 - Entrada manual do rendimento de acoplamento – PAN MotorSYS

Ao selecionar a opção **Medição**, conforme Figura 52, os campos de **Frequência Nominal**, **Torque** e **Rotação** de entrada (antes do acoplamento), e **Torque** e **Rotação** de saída (após o acoplamento), serão habilitados. Com isso, caso o usuário possua estes dados medidos, basta inseri-los e o programa fará automaticamente o cálculo das potências de entrada e saída do acoplamento, pelas seguintes equações [12]:

$$P = T \times \omega$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{N}{60}$$

P – potência [W];

ω – velocidade angular [rad/s]

f – frequência [Hz]

N – rotação [RPM]

O que resulta em uma equação da potência em função do torque e rotação:

$$P = T \times \frac{N}{60}$$

Com os dados de entrada e saída calculam-se as potências antes e depois do acoplamento, e ao clicar no botão **Calcular** o programa fornece o rendimento, dado por:

$$\eta_a(\%) = \frac{P_S}{P_E} \times 100$$

η_a – rendimento do acoplamento mecânico [%]

P_S – potência na saída do acoplamento [W]

P_E – potência na entrada do acoplamento [W]

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | ACOPLAMENTO | MOTOR | CÁLCULO

DIRETO | ENGRENAGENS | CORREIAS

Dados de Rendimento

Manual

Rendimento 100 %

Medição

Frequência Nominal 60 Hz

Torque (Entrada) 70 Nm Torque (Saída) 72 Nm

Rotação (Entrada) 3550 RPM Rotação (Saída) 3450 RPM

Potência (Entrada) 26009,666 W Potência (Saída) 25999,2 W

Rendimento 99,96 %

Calcular

Figura 52 - Cálculo de rendimento do acoplamento – PAN MotorSYS

Obrigatório selecionar uma das opções de entrada de dados do rendimento do acoplamento.

5.4.3 Motor

Aqui (Figura 53) são definidos os parâmetros básicos do motor elétrico, necessários para o cálculo da eficiência do sistema.

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | ACOPLAMENTO | MOTOR | CÁLCULO

Dados do Motor

Manual

Potência HP

Rotação RPM

Rendimento (50%) % Rendimento (75%) % Rendimento (100%) %

Selecionar

Potência HP

Rotação RPM

Rendimento (50%) % Rendimento (75%) % Rendimento (100%) %

Selecionar

Figura 53 - Tela de seleção do motor – PAN MotorSYS

Da mesma forma que na aba de **Acoplamento**, existem duas opções de entrada, sendo a primeira **Manual** (Figura 54), ou seja, basta o usuário preencher os campos com os respectivos dados.

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | ACOPLAMENTO | MOTOR | CÁLCULO

Dados do Motor

Manual

Potência: 30 HP

Rotação: 3500 RPM

Rendimento (50%): 91,8 % Rendimento (75%): 92,0 % Rendimento (100%): 92,0 %

Figura 54 - Entrada manual de dados do motor – PAN MotorSYS

A outra forma, **Selecionar** (Figura 55), fornece a opção de escolher um dos motores cadastrados no banco de dados, os quais foram importados seguindo o procedimento da seção 5.3. Escolhendo esta opção, o botão **Selecionar** será habilitado e ao clicar sobre ela, irá abrir uma nova tela, onde estarão listados todos os motores cadastrados, conforme Figura 56.

Selecionar

Potência: [] HP

Rotação: [] RPM

Rendimento (50%): [] % Rendimento (75%): [] % Rendimento (100%): [] %

Selecionar

Figura 55 - Seleção dos motores cadastrados – PAN MotorSYS

PAN MotorSYS - SELEÇÃO DO MOTOR

MOTOR_ID	FABRICANTE	POTENCIA	POTENCIA_UNID	ROTAC...	ROTACAO_UNID	REND_50	REND_75	REND_100
1	WEG	30	HP	885	RPM	91,8	92,8	93
2	WEG	30	HP	1180	RPM	92,1	93	93,2
3	WEG	30	HP	1770	RPM	91,1	92,8	93
4	WEG	30	HP	3520	RPM	90	91,9	91,3
5	WEG	30	HP	885	RPM	87,6	89,2	89,4
6	WEG	30	HP	1180	RPM	88,7	90	90,2
7	WEG	30	HP	1765	RPM	89	90,4	91
8	WEG	30	HP	3520	RPM	88,3	90	90,9
9	WEG	30	HP	880	RPM	87,6	89,2	89,4
10	WEG	30	HP	1175	RPM	88,7	90	90,2
11	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	90,5
12	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
13	WEG	30	HP	885	RPM	91,8	92,8	93
14	WEG	30	HP	1175	RPM	92,1	93	93,2
15	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93
16	WEG	30	HP	3530	RPM	90	91,9	92
17	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
18	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91
19	WEG	30	HP	1175	RPM	89,5	90,7	91
20	WEG	30	HP	880	RPM	88,5	89,5	90,2
21	WEG	30	HP	3530	RPM	90	91,9	92
22	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93
23	WEG	30	HP	1175	RPM	91,5	92	92,5
24	WEG	30	HP	885	RPM	89,5	90,5	91
25	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
26	WEG	30	HP	3540	RPM	87	88,5	89,5
27	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91,1
28	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91,1

Ok

Figura 56 - Lista de motores cadastrados – PAN MotorSYS

Cabe ao usuário selecionar o motor que se adeque ao sistema estudado e clicar no botão **Ok**. Os dados serão preenchidos automaticamente na tela, conforme Figura 57.

● Selecionar					
Potência	30,00	HP			
Rotação	3530	RPM			
Rendimento (50%)	90,00	%	Rendimento (75%)	91,90	%
			Rendimento (100%)	92,00	%
<input type="button" value="Selecionar"/>					

Figura 57 - Dados do motor selecionado – PAN MotorSYS

Necessário escolher uma das opções de entrada de dados do motor.

5.4.4 Cálculo

Nesta última aba (Figura 58) serão obtidos os resultados do estudo. Apenas a aba de bombas está desenvolvida, porém a adição de novas abas poderá ocorrer conforme o avanço das versões do programa.

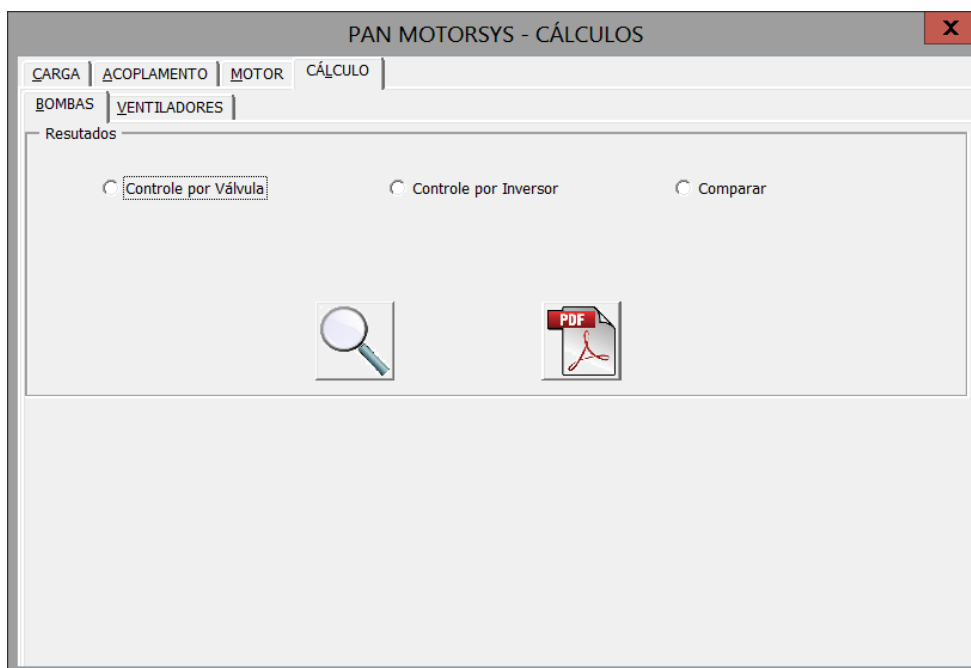




Figura 58 - Tela de cálculo – PAN MotorSYS

Pode-se fazer um estudo do sistema de bombeamento controlado por válvula de estrangulamento, por acionamento com inversor de frequência ou uma comparação entre os dois casos.

O botão da esquerda  permite visualizar na tela do programa os resultados da opção de estudo selecionada. A Figura 59 mostra o resultado obtido para o estudo de controle por válvula, a Figura 60 o de controle por inversor e a Figura 61 a comparação dos resultados obtidos. Já o botão da direita , permite salvar em um documento, de extensão .pdf, os resultados obtidos no estudo.

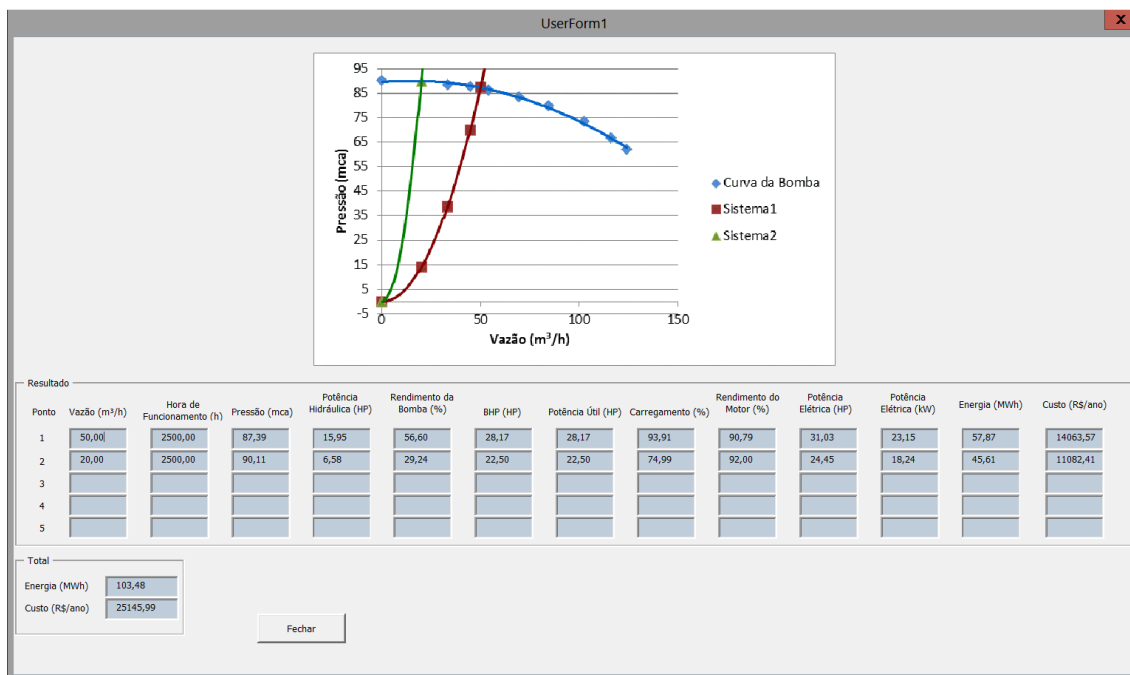


Figura 59 - Resultado visto em tela do controle por válvula – PAN MotorSYS

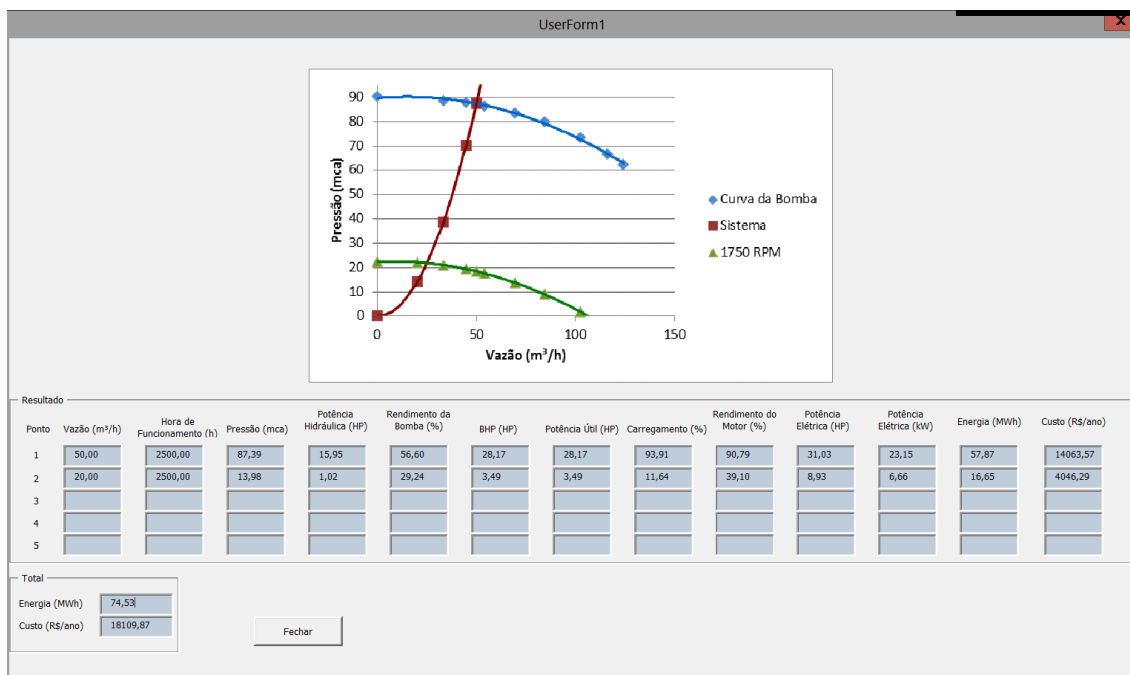


Figura 60 - Resultado visto em tela do controle por inversor – PAN MotorSYS

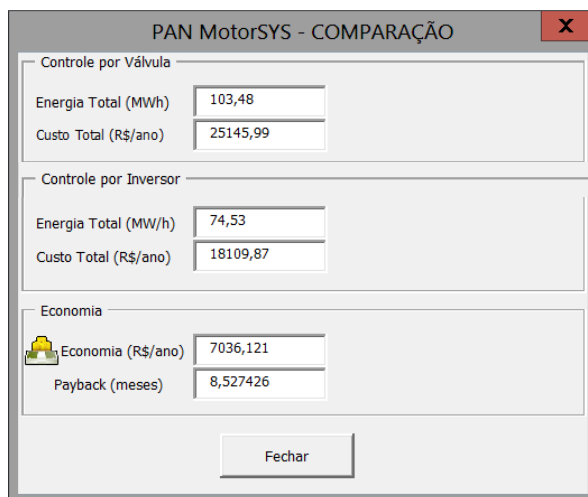


Figura 61 - Resultado da comparação – PAN MotorSYS

Um exemplo do relatório gerado pelo programa está no ANEXO I – RELATÓRIO FINAL DO EXEMPLO PROPOSTO – PAN MOTORSYS.

5.5. Módulo: Configurações

Este módulo fornece, apenas, a opção de exibir a planilha Excel que está oculta, para verificação dos dados de suporte, ou ocultá-lo novamente. Esta tela está representada na Figura 62.

Para exibir, basta clicar no botão , e para ocultar no botão .



Figura 62 - Tela de configurações – PAN MotorSYS

5.6. Resultados

Os resultados são analisados a partir dos valores hidráulicos na carga, até alcançar os valores elétricos de consumo, na alimentação do motor.

Os valores de cada coluna das tabelas de resultados (Figura 59, Figura 60 e Figura 61) são obtidos das seguintes formas:

- **Vazão:** dado fornecido pelo usuário, ao informar o ciclo de trabalho do sistema, na seção 5.4.1.
- **Hora de Funcionamento:** dado fornecido pelo usuário, ao informar o ciclo de trabalho do sistema, na seção 5.4.1.
- **Pressão:** no estudo do controle por válvula, é obtida através da **Curva da Bomba** da Figura 59, a qual foi obtida a partir dos dados dos pontos de vazão e altura manométrica indicados na seção 5.4.1, e nada mais é do que a própria curva do gráfico fornecido pelo fabricante. Obtém-se através de uma regressão polinomial dos pontos inseridos, utilizando a função de **Linha de Tendências** do Microsoft Excel. Com isso, dado o valor de vazão, ele retorna o valor da altura manométrica, de acordo com aquela função. Com este novo valor de altura manométrica traça-se a curva do **Sistema2** da Figura 59, que é a curva do sistema para uma nova vazão de operação. Esta curva é uma aproximação para a equação [10]:

$$H_{man} = k_1 + k_2 Q^2$$

H_{man} – altura manométrica [mca]

k_1 – altura estática [m]

k_2 – coeficiente da curva [constante]

Q – vazão [m^3/h]

Já no caso do controle por inversor de frequência, há uma alteração na rotação do motor, resultando em uma nova curva da bomba. A equação da curva da bomba é obtida através de uma aproximação a uma equação de segundo grau, obtida pela **Curva da Bomba** da Figura 60. Porém, com a alteração da rotação, os coeficientes desta equação são alterados também, de forma que [12]:

$$H_{man} = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$$

$$H'_{man} = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2$$

$$b_0 = a_0 r_n^2; \quad b_1 = a_1 r_n; \quad b_2 = a_2$$

H_{man} = equação para altura manométrica na rotação nominal [mca]

H'_{man} = equação para altura manométrica na nova rotação [mca]

a_0, a_1, a_2 – coeficientes da equação de H_{man}

b_0, b_1, b_2 – coeficientes da equação de H'_{man}

r_n – relação entre a nova rotação pela rotação nominal

Através desta nova equação, a curva de **1750 RPM** é traçada, conforme Figura 60, e também o valor de altura manométrica para a nova vazão do ciclo de trabalho.

- **Potência Hidráulica:** potência cedida pela bomba e absorvida pelo líquido, dado pela equação [12]:

$$P_h = \frac{\gamma \times Q \times H_{man}}{274}$$

P_h – potência [HP]

γ – densidade [kg/m^3]

Q – vazão [m^3/h]

H_{man} – altura manométrica [mca]

O valor de densidade é informado na seção 5.4.1 e os valores de vazão e altura manométricas são as do ponto de operação.

- **Rendimento da Bomba:** razão entre a potência cedida pela bomba pela potência absorvida. São conhecidos os valores de rendimentos, na rotação nominal, para os pontos que foram informados ao programa, porém não se sabe os rendimentos dos pontos dos ciclos de trabalho. Para obter estes valores, foi feito novamente uma regressão polinomial com os dados inseridos, obtendo uma função **Vazão x Rendimento**. A partir desta função, foi determinado o valor de rendimento para cada valor de vazão informado pelo usuário no campo de ciclo de trabalho. No controle por inversor existe uma variação na rotação, o que resulta na variação do comportamento do rendimento da bomba [12].

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{0,1}$$

η_1 – rendimento na rotação nominal [%]

η_2 – rendimento na nova rotação [%]

N_1 – rotação nominal [RPM]

N_2 – nova rotação [RPM]

- **BHP:** potência absorvida pela bomba. Seu valor é maior que a potência hidráulica, devido às perdas hidráulicas e mecânicas no interior da bomba. Ela é obtida pela razão da potência hidráulica pelo rendimento da bomba.
- **Potência Útil:** potência na saída do eixo do motor, antes da conexão com o acoplamento mecânico. Para chegar a esta potência, basta dividir a potência BHP, absorvida pela bomba, pelo rendimento do acoplamento, definido na seção 5.4.2.
- **Carregamento:** percentual de carga consumida pelo sistema em relação à potência nominal do motor, dada pela razão da potência útil com a potência nominal do motor, definido na seção 5.4.3.
- **Rendimento do Motor:** razão da potência do eixo do motor em relação à potência consumida por ela. Varia de acordo com o carregamento, porém só são conhecidos os rendimentos a 50%, 75% e 100% da carga, inseridos no programa na seção 5.4.3. Para obter os valores de rendimento para quaisquer carregamentos, foi adotado neste trabalho uma aproximação que é utilizada nos estudos do Procel. Com os valores de rendimentos conhecidos é feita uma regressão polinomial de terceiro grau, **Carregamento x Rendimento**, e através da equação alcançada é possível determinar o rendimento aproximado para os demais carregamentos.
- **Potência Elétrica:** razão da potência útil no eixo do motor, pelo rendimento do motor. São duas colunas para este parâmetro, sendo uma na unidade hp e a outra convertida para kW, obedecendo a relação: $1HP = 746W$.
- **Energia:** valor da energia consumida para aquele ponto de operação, definido no ciclo de trabalho. Conceitualmente, energia é o produto da potência com o tempo, neste caso, é resultado do produto entre a potência elétrica consumida, com o tempo de funcionamento de cada ponto de operação, definidos na seção 5.4.1, nos ciclos de trabalho. O total de energia é a soma da energia gasta em cada ponto de operação.
- **Custo:** produto entre a energia consumida com o custo da energia, informado na seção 5.4.1. O custo total de operação é a soma dos custos para cada ciclo de trabalho.

- **Economia:** diferença entre o custo total obtido no estudo do controle por válvulas, e o custo total obtido no estudo do controle por inversor de frequência.
- **Payback:** tempo de retorno do investimento, pois a aquisição de um inversor de frequência acarreta em um acréscimo no orçamento do projeto. É dado pela razão do investimento inicial, fornecido pelo usuário na seção 5.4.1 e a economia alcançada. Por fim, o resultado desta razão é multiplicado por 12 para obter o tempo de retorno em meses.

5.7. Pontos a Melhorar

Esta ferramenta atende bem as necessidades de um estudo de eficiência energética de sistema de bombeamento, porém existem outros recursos, que não foram implementados nesta versão do trabalho, e podem tornar o programa ainda mais completo.

Ao acrescentar novos tipos de cargas e acoplamentos, aumentaria a gama de sistemas a serem estudados, que na versão atual, está limitado apenas ao de bombeamento.

A obtenção dos valores de rendimento do motor elétrico poderia, também, ser através do gráfico do fabricante, da mesma forma como é feito para o valor de altura manométrica da bomba, pois existem estudos onde o contratante fornece esta curva e sua utilização se faz necessária. Além disso, o programa não faz o estudo de dimensionamento do motor, ele apenas aceita a escolha do usuário. Existe a possibilidade de programar este recurso, levando em consideração o carregamento, determinando se o motor está subdimensionado, bem dimensionado ou sobredimensionado, oferecendo ao usuário as melhores opções de motores, a partir dos cadastrados em seu banco de dados.

Outro ponto interessante seria a possibilidade de obter os rendimentos da bomba através do gráfico **Vazão x Potência**, também fornecidos pelo fabricante. Atualmente, o usuário precisa obter este valor visualmente, através do gráfico **Vazão x Altura Manométrica**, inserindo uma margem de erro grande ao estudo.

6. EXEMPLO

Nesta seção, será solucionado um problema proposto no guia técnico da Eletrobras [13], utilizando o programa PAN MotorSYS. Os resultados obtidos pela ferramenta serão comparados aos do guia técnico [13] e será verificada sua validação.

6.1. Enunciado

Considere um sistema de bombeamento típico com controle de vazão realizado com uma válvula de estrangulamento. Existe uma proposta de instalação de um acionamento eletrônico para efetuar esse mesmo controle de vazão. Calcule a economia de energia elétrica a ser conseguido com esse novo sistema.

DADOS DO PROBLEMA:

- Desnível geométrico entre reservatórios = 25 m;
- Vazão nominal do sistema = 100 m³/h;
- Custo da energia = R\$ 120,00 / MWh;
- Horas de funcionamento = 8.000 h/ano;
- Fluido de trabalho = Água (densidade = 1);
- Rendimento do acoplamento = 100%;
- Rendimento do motor = 93,1% (30 cv – 3560 RPM – 100% de carga);
- Investimento do inversor de frequência = R\$ 6.000,00
- Bomba – Tipo KSB Meganorm 50-160 com rotor 174 (curva na Figura 63).

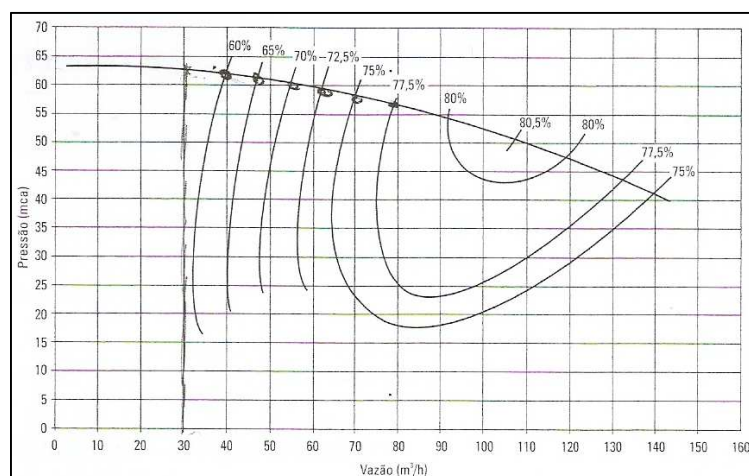


Figura 63 - Gráfico do da bomba – Tipo KSB Meganorm 50-160 com rotor 174

6.2. Inserção dos Dados no Programa

Os dados foram inseridos no módulo **Calcular** do programa, conforme Figura 64.

Figura 64 - Entrada de dados do exemplo – PAN MotorSYS

Optou-se pela aquisição dos pontos da curva do fabricante através da marcação dos pontos na imagem, conforme Figura 65. Os pontos foram escolhidos onde há a informação de rendimento, que foram escritos manualmente nos respectivos campos.

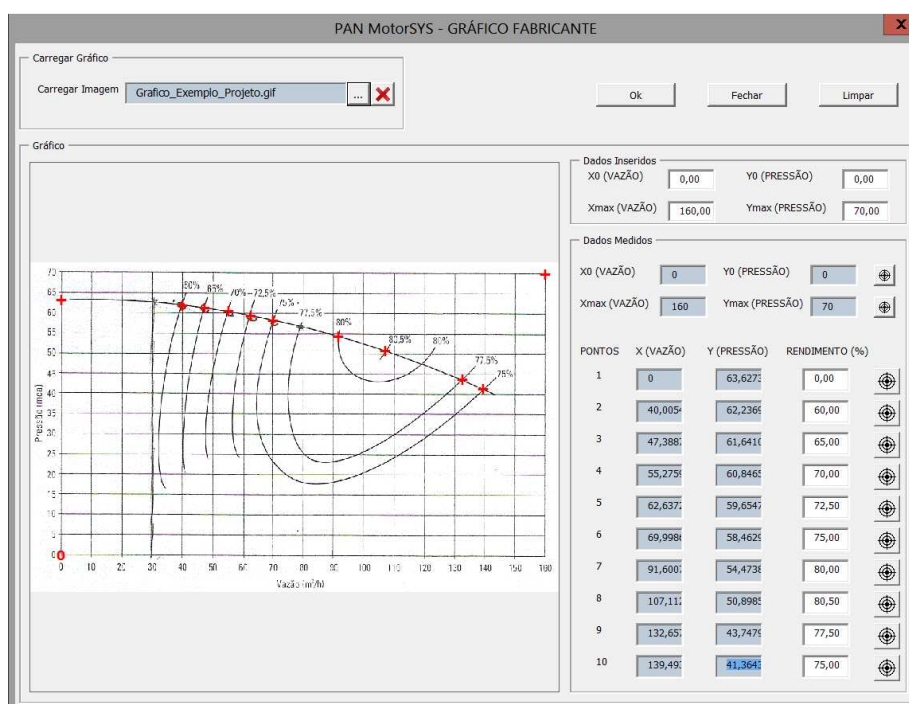


Figura 65 - Pontos do gráfico do fabricante – PAN MotorSYS

Como o valor de rendimento do acoplamento foi dado como constante e igual a 100%, optou-se pela inserção manual, mostrado na Figura 66.

Figura 66 - Rendimento do acoplamento mecânico – PAN MotorSYS

Para os parâmetros dados do motor, fez-se uma busca pelos motores cadastrados no banco de dados do programa e foi escolhido um motor comercial, da WEG, com os valores próximos ao do enunciado (Figura 67). Os dados do motor escolhido são:

- Potência = 30 hp;
- Rotação = 3530 RPM;
- Rendimento (a 100% da carga) = 92%;
- Rendimento (a 75% da carga) = 91,7%;
- Rendimento (a 50% da carga) = 90%.

Estes valores aparecem na tela da Figura 68.

MOTOR_ID	FABRICANTE	POTENCIA	POTENCIA_UNID	ROTAC...	ROTACAO_UNID	REND_50	REND_75	REND_100
9	WEG	30	HP	880	RPM	87,6	89,2	89,4
10	WEG	30	HP	1175	RPM	88,7	90	90,2
11	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	90,5
12	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
13	WEG	30	HP	885	RPM	91,8	92,8	93
14	WEG	30	HP	1175	RPM	92,1	93	93,2
15	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93
16	WEG	30	HP	3530	RPM	90	91,9	92
17	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
18	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91
19	WEG	30	HP	1175	RPM	89,5	90,7	91
20	WEG	30	HP	880	RPM	88,5	89,5	90,2
21	WEG	30	HP	3530	RPM	90	91,9	92
22	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93
23	WEG	30	HP	1175	RPM	91,5	92	92,5
24	WEG	30	HP	885	RPM	89,5	90,5	91
25	WEG	30	HP	3530	RPM	90,2	91	91
26	WEG	30	HP	3540	RPM	87	88,5	89,5
27	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91,1
28	WEG	30	HP	1765	RPM	89,3	90	91,1
29	WEG	30	HP	1175	RPM	89,5	90,7	91,1
30	WEG	30	HP	1180	RPM	89,5	90,7	91
31	WEG	30	HP	880	RPM	89	90,4	91
32	WEG	30	HP	880	RPM	89	90,4	91
33	WEG	30	HP	3530	RPM	90	91,9	92
34	WEG	30	HP	3550	RPM	91	92	92
35	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93
36	WEG	30	HP	1760	RPM	91,5	92,5	93

Figura 67 - Escolha do motor para o exemplo – PAN MotorSYS

PAN MOTORSYS - CÁLCULOS

CARGA | ACOPLAMENTO | MOTOR | CÁLCULO

Dados do Motor

Manual

Potência: [] HP
 Rotação: [] RPM
 Rendimento (50%): [] % Rendimento (75%): [] % Rendimento (100%): [] %

Seleccionar

Potência: 30,00 HP
 Rotação: 3530 RPM
 Rendimento (50%): 90,00 % Rendimento (75%): 91,90 % Rendimento (100%): 92,00 %

Figura 68 - Dados do motor escolhido para o exemplo – PAN MotorSYS

Por fim, foram obtidos os seguintes resultados:

- **Controle por válvula**

A Figura 69 é o resultado da análise do exemplo proposto, no uso de controle por válvula de estrangulamento, obtido pelo programa.

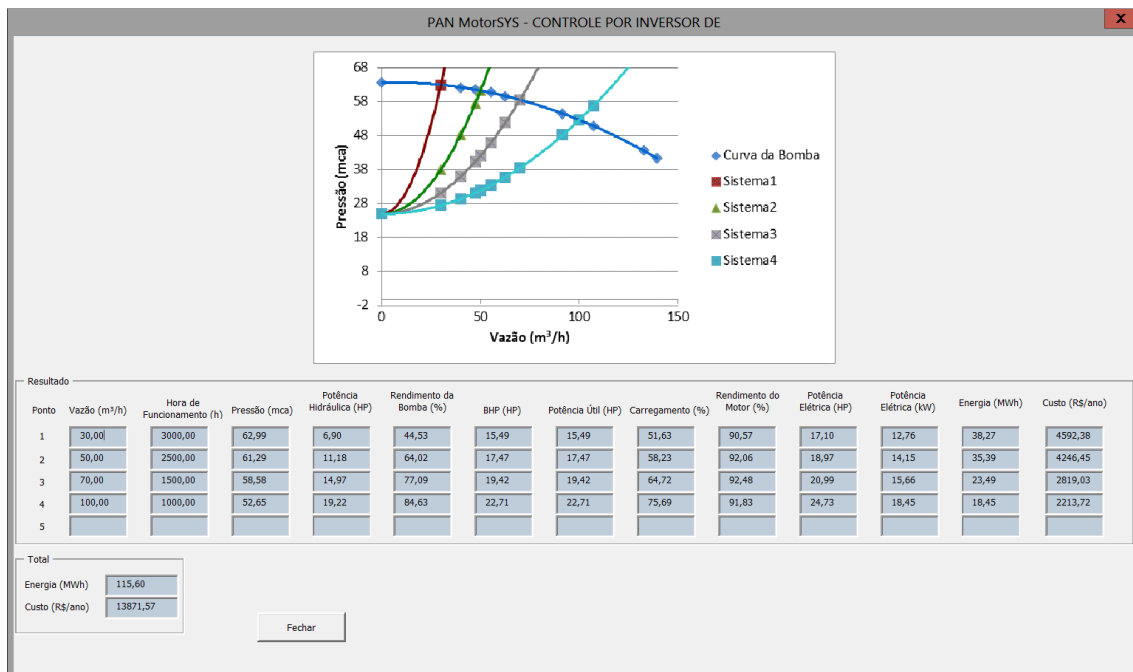


Figura 69 - Resultado do exemplo com controle por válvula – PAN MotorSYS

Os resultados encontrados no guia técnico [13] estão descritos na Tabela 1.

PONTO	VAZÃO (m³/h)	HORAS	PRESSÃO (mca)	Ph (hp)	REND. BOMBA (%)	BHP (hp)	POTENCIA ELETRICA (hp)	POTENCIA ELETRICA (kW)	ENERGIA (MWh)	CUSTO (R\$/ano)
1	30	3.000	62,0	6,79	57,0	11,91	12,79	9,54	28,63	3.435,41
2	50	2.500	61,0	11,13	69,0	16,13	17,33	12,93	32,32	3.878,02
3	70	1.500	57,5	14,69	76,0	19,33	20,76	15,49	23,23	2.787,81
4	100	1.000	51,0	18,61	80,4	23,15	24,87	18,55	18,55	2.226,05
TOTAL									102,73	12.327,30

Tabela 1 – Resultados da apostila para controle por válvula.

- **Controle por inversor**

A Figura 70 é o resultado da análise, do exemplo proposto, no uso de controle inversor de frequência, obtido pelo programa.

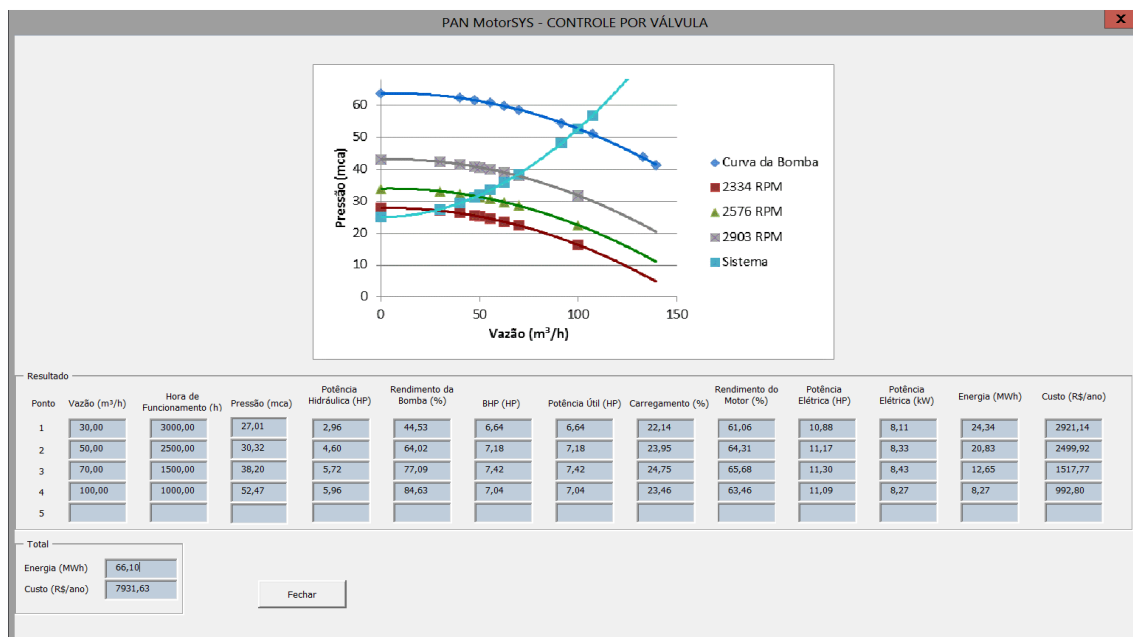


Figura 70 - Resultado do exemplo com controle por inversor – PAN MotorSYS

Os resultados encontrados no guia técnico [13] estão descritos na Tabela 2.

PONTO	VAZÃO (m³/h)	HORAS	PRESSÃO (mca)	Ph (hp)	REND. BOMBA (%)	BHP (hp)	POTENCIA ELETRICA (hp)	POTENCIA ELETRICA (kW)	ENERGIA (MWh)	CUSTO (R\$/ano)
1	30	3.000	29,0	3,18	64,0	4,96	5,33	3,98	11,93	1.431,13
2	50	2.500	33,0	6,02	75,0	8,03	8,62	6,43	16,08	1.930,11
3	70	1.500	38,8	9,91	78,5	12,63	13,56	10,12	15,18	1.821,26
4	100	1.000	48,0	17,52	80,5	21,76	23,37	17,44	17,44	2.092,50
TOTAL									60,63	7.275,00

Tabela 2 – Resultados da apostila para controle por inversor.

- **Comparação**

A Figura 71 é o resultado da comparação do consumo de energia entre o controle por válvula de estrangulamento e por inversor de frequência, do exemplo proposto. O relatório emitido encontra-se no ANEXO I – RELATÓRIO FINAL DO EXEMPLO PROPOSTO – PAN MOTORSYS.

PAN MotorSYS - COMPARAÇÃO	
Controle por Válvula	
Energia Total (MWh)	115,60
Custo Total (R\$/ano)	13871,57
Controle por Inversor	
Energia Total (MWh/h)	66,10
Custo Total (R\$/ano)	7931,63
Economia	
Economia (R\$/ano)	5939,94
Payback (meses)	12,12134
Fechar	

Figura 71 - Tabela de comparação – PAN MotorSYS

Os resultados encontrados no guia técnico [13] estão descritos nas Tabela 3.

ECONOMIA (MWh)	42,10
ECONOMIA (R\$/ano)	5.052,29
PAYBACK (meses)	15

Tabela 3 – Resultados da apostila para economia do sistema.

6.3. Análise dos Resultados

Ao observar os resultados finais, comparando os encontrados na Figura 68 e Tabela 3, é notório que há uma diferença na economia entre elas, o que resultou em uma discrepância de, aproximadamente, três meses no tempo de retorno (payback).

Para descobrir a origem dessa diferença, fazem-se as comparações da Figura 69 com a Tabela 1, e da Figura 70 com a Tabela 2.

Da primeira comparação, observa-se que existe uma pequena diferença nos valores de **Pressão**, o que é aceitável, pois os valores da apostila foram obtidos com uma aproximação visual. Porém a diferença entre os rendimentos da bomba destoam, e este foi o motivo da diferença final. Como visto na seção 5.6, o rendimento, para

cada valor de vazão dos pontos de operação, é obtido através de uma regressão linear, utilizando os valores de vazão e rendimento conhecidos e inseridos no programa pelo usuário. Esta é uma forma mais exata de alcançar o valor de rendimento, em comparação com a estimativa visual do gráfico, feito pelo profissional, e aplicada na solução do exemplo, pelo guia técnico [13].

No exemplo do guia técnico [13] o rendimento do motor elétrico foi considerado constante a 100% da carga, já no PAN MotorSYS o rendimento é função do carregamento, isto também explica a diferença no valor do *payback*.

Fazendo uma análise mais global, é possível concluir que os resultados obtidos através do programa PAN MotorSYS, para um problema de substituição do controle de vazão por válvula de estrangulamento, de um sistema de bombeamento, por um acionamento eletrônico de variação de velocidade, são bastante válidos, comparando com resultado já conhecidos e apresentados pelo guia técnico da Eletrobras [13].

Além disso, o programa possui funções importantes, como a obtenção dos valores de altura manométrica de forma computacional e os cálculos do rendimento da bomba e do rendimento do motor em função do carregamento, visto que, estes dados eram todos obtidos através de uma estimativa visual da imagem de gráficos.

7. CONCLUSÃO

O PAN MotorSYS foi desenvolvido para suprir uma demanda de ferramentas computacionais na análise de eficiência em sistemas motrizes, que faça o estudo de todos os componentes do deste sistema.

De forma inicial, foi feita apenas para o cálculo de eficiência energética e econômica nos casos de substituição das válvulas de estrangulamento, em sistemas de bombeamento, por acionamento eletrônico de velocidade variável.

O PAN MotorSYS possui uma interface bem amigável ao usuário, além de ter funções interativas, como a obtenção de valores apenas clicando sobre a imagem do gráfico. A visualização dos resultados é clara e a opção de gerar um documento é positiva

Os resultados alcançados no estudo de um exemplo proposto, em comparação a resultados já conhecidos, foram coerentes e válidos. As diferenças mais significativas encontradas foram consequências da falta de precisão na obtenção de valores no método adotado pelo guia técnico [13].

Ela pode ser utilizada no âmbito acadêmico, em laboratórios, na comparação dos resultados extraídos do programa com os medidos em bancada. Pode ser aplicado tanto nas cadeiras oferecidos pela engenharia elétrica, como a de engenharia mecânica também.

Na versão atual, a ferramenta ainda possui limitações, mas por ser um programa de linguagem aberta, é possível o desenvolvimento de novas funcionalidades que o aperfeiçoe e, talvez, o torne uma opção interessante no mercado de estudo de eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Acesso em: 31 de mar. 2013 as 15:43:50.
- [2] Balanço de Energia Útil 2005 / Ministério de Minas e Energia - Brasília: MME, 2005. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/arquivos/balanco_energetico_nacional/6_-_Eficiencia_no_Uso_de_Energia/BEU_2005.html. Acesso em: 08 de abr. 2013 as 17:22:27.
- [3] PROCEL webpage. Disponível em: <http://www.elektrobras.com/elb/procel/main.asp>. Acesso em: 01 de mar. 2013 as 15:32:21.
- [4] NIELSEN, S. B. Programa para cálculo de sistemas motrizes energeticamente eficientes. Revista Eletricidade Moderna [Aranda Editora], edição 456, p. 52-65, mar, 2012.
- [5] STEPHAN, R. M.; AMERICO, M.; LIMA, A. G. G.; RODRIGUES, A.. Electric Energy Conservation In Pumping Processes at a Refinery. In: European Conference On Power Electronics And Applications, 1995, Sevilha, Espanha. EPE'95, 1995. v.3. p. 633-638.
- [6] ALVES, G.A. "Economia de Energia em bombas, Compressores e Ventiladores", Technical Report EPOT 53 CEPEL, 1989.
- [7] HERRERA, A. B.; FADRIGO, L. R. G. "UNITED PULP AND PAPER COMPANY, Inc.: Installation of VSD for deaerator pump", Case Study GERIAP, UNEP 2006.
- [8] SERGIO ALVES DE LIMA, A. Oportunidades de eficiência energética em motores e em acionadores de velocidade ajustável (AVAs). Revista O Setor Elétrico [Atitude Editorial], edição 85, p. 54-59, fev, 2013.
- [9] FITZGERALD, A. E.; JR, C. K.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 6ed. São Paulo: Bookman, 2008.
- [10] OLIVER, J. A. Adjustable Speed Drives: Application Guide. 1992. p. 83-110.
- [11] STEPHAN, R. M. Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas. 1ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2013. v. 1. 230p
- [12] MACINTYRE, A.J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2ed. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, LTC, 1980.
- [13] SZYSZKA, E.; AMERICO, M. Guia Avançado: Metodologia de realização de diagnóstico energético, Eletrobras/Procel Indústria. p. 45-48.
- [14] STEPHAN, R. M. A evolução dos acionamentos estáticos e suas perspectivas. Revista Eletricidade Moderna [Aranda Editora], p. 56-62, fev, 1995.

- [15] STEPHAN, R. M.; HANITSCH, R. Guia dos acionamentos CA de velocidade controlada. Revista Eletricidade Moderna [Aranda Editora], p. 32-41, abr, 1995.
- [16] STEPHAN, R. M.; SANGUEDO, C. A. Aplicação de conversores eletrônicos em áreas classificadas. Revista Eletricidade Moderna [Aranda Editora], p. 48-60, mar, 1997.
- [17] ELETROBRAS webpage. Disponível em: <http://www.elektrobras.com/>. Acesso em: 31 de mar. 2013 as 15:35:32.
- [18] MST webpage. Disponível em: <http://www.motorsystems.org/motor-systems-too>. Acesso em: 31 de mar. As 15:38:12.

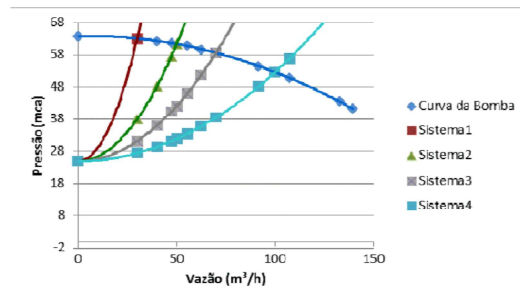
ANEXOS

ANEXO I – RELATÓRIO FINAL DO EXEMPLO PROPOSTO – PAN MOTORSYS

RELATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

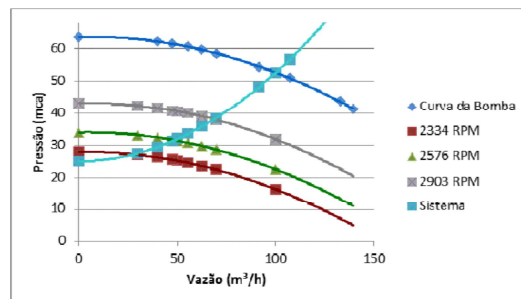
SISTEMA DE BOMBEAMENTO

CONTROLE POR VÁLVULA DE ESTRANGULAMENTO:



Ponto	Vazão (m³/h)	Hora de Funcionamento (h)	Pressão (mca)	Potência Hidráulica (HP)	Rendimento da Bomba (%)	BHP (HP)	Potência Útil (HP)	Carregamento (%)	Rendimento do Motor (%)	Potência Elétrica (HP)	Potência Elétrica (kW)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	30	3000	62,99	6,90	44,53	15,49	15,49	51,63	90,57	17,10	12,76	38,27	4592,38
2	50	2500	61,29	11,18	64,02	17,47	17,47	58,23	92,06	18,97	14,15	35,39	4246,45
3	70	1500	58,58	14,97	77,09	19,42	19,42	64,72	92,48	20,99	15,66	23,49	2819,03
4	100	1000	52,65	19,22	84,63	22,71	22,71	75,69	91,83	24,73	18,45	18,45	2213,72
5													

CONTROLE POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA:



Ponto	Vazão (m³/h)	Hora de Funcionamento (h)	Pressão (mca)	Potência Hidráulica (HP)	Rendimento da Bomba (%)	BHP (HP)	Potência Útil (HP)	Carregamento (%)	Rendimento do Motor (%)	Potência Elétrica (HP)	Potência Elétrica (kW)	Energia (MWh)	Custo (R\$/ano)
1	30	3000	27,01	2,96	44,53	6,64	6,64	22,14	61,06	10,88	8,11	24,34	2921,14
2	50	2500	25,20	4,60	64,02	7,18	7,18	23,95	64,31	11,17	8,33	20,83	2499,92
3	70	1500	22,40	5,72	77,09	7,42	7,42	24,75	65,68	11,30	8,43	12,65	1517,77
4	100	1000	16,32	5,96	84,63	7,04	7,04	23,46	63,46	11,09	8,27	8,27	992,80
5													

ECONOMIA (R\$/ano)	5939,94
PAYBACK (meses)	12,12