

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Estudo comparativo das tecnologias de retificação empregadas na etapa de  
formação de baterias chumbo-ácido

*Trabalho de Conclusão de Curso*

HENZA RAFAELA BATISTA CUNHA

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira

Campina Grande-PB  
Dezembro de 2012

# TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Henza Rafaela Batista Cunha

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Coordenadoria do Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira

Campina Grande-PB  
Dezembro de 2012

# TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Henza Rafaela Batista Cunha

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Coordenadoria do Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira

Orientador

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Componente da banca

Campina Grande-PB  
Dezembro de 2012

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, por tanto amor, investimento, confiança e paciência. Vocês são a razão pela qual tudo isso se tornou possível. Obrigada!

Agradeço à minha família, pelo apoio, dedicação e amor destinados a mim, mesmo com a distância. Vocês foram e sempre serão meus primeiros mestres.

Aos amigos, que muitas vezes fizeram o papel da família, encurtando as distâncias, diminuindo a saudade. Obrigada pela companhia, pela parceria, pelo incentivo, pelas risadas, pelas longas madrugadas de estudos. Vocês tornaram minha vida mais alegre e fazem parte dessa conquista.

Aos professores e à Coordenação de Engenharia Elétrica, pelo ensino, dedicação, paciência e zelo despendidos ao longo dos anos. A minha gratidão, por transformarem uma estudante em uma profissional.

Agradeço a Deus, pelo presente da vida. Meu escudo, minha fortaleza, meu refúgio nos momentos maus, fonte de alegria do meu coração, autor e consumidor da minha fé. A Ti, toda honra e toda glória.

*À minha mãe, meu referencial,  
com todo o amor, respeito e  
gratidão do meu coração.*

## Sumário

<b>Lista de Figuras</b> .....	6
<b>Lista de Tabelas</b> .....	8
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	9
<b>1. Introdução</b> .....	10
<b>2. Introdução sobre circuitos retificadores</b> .....	12
<b>2.1. SCR</b> .....	13
<b>2.2. IGBT</b> .....	14
<b>3. Processo de formação da bateria</b> .....	15
<b>3.1. Sistema de Retificação</b> .....	18
<b>3.2. Comportamento da carga durante a formação</b> .....	19
<b>4. Estudos de retificadores baseados em SCR e IGBT desenvolvidos por empresas para o mercado de baterias automotivas</b> .....	24
<b>4.1. Resultados da <i>Digatron firing circuits</i></b> .....	26
<b>4.2. Resultados da <i>SoftSlim e Power Designers</i></b> .....	32
<b>5. Testes realizados</b> .....	35
<b>6. Avaliação dos impactos técnicos e econômicos dos circuitos retificadores na Acumuladores Moura</b> .....	43
<b>6.1. Análise energética da Seção 05 da formação</b> .....	43
<b>6.2. Simulações</b> .....	46
<b>6.3. Comparativo entre as tecnologias</b> .....	54
<b>7. Conclusão</b> .....	57
<b>8. Referências</b> .....	59

## Lista de Figuras

Figura 1-Fluxograma de Produção de Baterias Automotivas. Fonte: [5].	11
Figura 2-Pontes retificadoras monofásicas: a) Semicontrolada assimétrica, b) Semicontrolada simétrica, c) Totalmente controlada. Fonte: [7].	13
Figura 3-Circuito retificador usando SCR na seção de formação da Moura. Fonte: [9].	14
Figura 4-Sonda de temperatura para as baterias.	14
Figura 5-Retificador com IGBT.	15
Figura 6-Esquema de uma célula de chumbo-ácido de um acumulador. Fonte: [1].	16
Figura 7-Componentes da bateria. Fonte: [1].	16
Figura 8-Bancos de Formação da seção 05 da formação da Moura. Fonte: [9].	18
Figura 9-Módulos SPM instalados na seção 05 de formação da Moura.	19
Figura 10-(a) Indutor, (b) Sala de indutores da seção 05 da formação. Fonte: [9].	19
Figura 11-Analisador de grandezas elétricas PowerNET P-600. Fonte: [10].	20
Figura 12-Analisador de grandezas elétricas instalado na seção 05 de formação.	21
Figura 13-Plano de carga para bateria MI60GD.	22
Figura 14-Gráfico do comportamento da carga da bateria MI60GD durante a formação, gerado pelo <i>software</i> supervisor.	22
Figura 15-Fator de potência do SCR em relação à tensão de saída como uma porcentagem da tensão nominal. Fonte: [11].	24
Figura 16-Comparativo entre o fator de potência nos circuitos com SCR e IGBT em relação à razão entre tensão de saída e nominal. Fonte: [11].	25
Figura 17-Comparativo da distorção harmônica individual nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte:[11].	26
Figura 18-Experimento realizado pela Digatron para avaliar os dados CA nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].	27
Figura 19-Comportamento da potência de saída durante o processo de formação. Fonte:[11].	28
Figura 20-Comparação da potência de saída CC com a potência de entrada CA no circuito com IGBT. Fonte: [11].	28
Figura 21-Comparação entre a potência de entrada CA dos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].	29
Figura 22-Comparação entre a potência real de entrada CA e a potência reativa de entrada do circuito com SCR. Fonte: [11].	29
Figura 23-Eficiência no uso de circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].	31
Figura 24-Comparação do fator de potência durante o processo de formação nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].	31
Figura 25-Comparativo do THD durante o processo de formação para os circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].	32
Figura 26-Gráfico comparativo da evolução da formação quando usado circuitos com SCR e IGBT nos ensaios realizados em 04/05/2011. Fonte: [13].	34
Figura 27-Gráfico de corrente, medição de 30/05/2011.	36
Figura 28-Gráfico da tensão entre linhas, medição de 30/05/2011.	37
Figura 29-Gráfico do fator de potência, medição de 30/05/2011.	38
Figura 30-THD de tensão, medição realizada em 05/07/2011.	40
Figura 31-THD de corrente, medição realizada em 05/07/2011.	41
Figura 32-Harmônicos ímpares da tensão V2, medição realizada em 05/07/2011.	42
Figura 33-Gráfico do relatório Anual de Consumo Ativo de 2010 da Acumuladores Moura.	45

Figura 34-Gráfico do relatório Anual de Consumo Ativo de 2011 até junho, na Acumuladores Moura.....	45
Figura 35-Circuito referente ao sistema de retificação com SCR.....	47
Figura 36-Tensão de entrada $V_s$ , corrente da fonte $i_s$ , fator de potência e tensão de saída retificada $V_{out}$ no circuito retificador com SCR. ....	47
Figura 37- THD de corrente do circuito retificador com SCR. ....	48
Figura 38-Circuito referente ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo, simulado no PSIM. ....	48
Figura 39-Tensão de entrada $V_s$ , corrente da fonte $i_s$ , fator de potência e tensão de saída retificada $V_{out}$ no circuito retificador com SCR e filtro ativo. ....	49
Figura 40- THD de corrente referente ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo.....	49
Figura 41- Comportamento da corrente da fonte $I_s$ , da corrente de fase $I_a$ , da corrente de compensação do filtro $I_{cont}$ e da corrente de erro $I_{erro}$ , referentes ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo. ....	50
Figura 42- Conversor abaixador <i>buck</i> com IGBT, usado como referência pela SoftSlim. Fonte:[13].....	50
Figura 43-Circuito similar ao da Figura 43 simulado com e sem malha de controle. ....	51
Figura 44- Comparativo entre o fator de potência do circuito com malha de controle VAPF1_PF, e do circuito sem a malha de controle VAPF2_PF. ....	52
Figura 45-Comparativo entre o THD de corrente do circuito com malha de controle 'thd', e do circuito sem a malha de controle 'thd2'. ....	52
Figura 46-Circuito com IGBT referente à Figura 5, simulado no PSIM. ....	53
Figura 47-Tensão de entrada $V_{sa}$ e tensão CC de saída $V_{bus}$ do circuito com IGBT. ....	53
Figura 48- THD de corrente do circuito com IGBT. ....	54
Figura 49-Tensão de fase corrente e fator de potência do circuito com IGBT.....	54



## Lista de Tabelas

Tabela 1-Subdivisão da área fabril da unidade 01. ....	11
Tabela 2-Tabela resumida com as grandezas elétricas, contida no relatório simplificado gerado pelo <i>software</i> analisador P-600 referente ao plano de carga mostrado na Figura 13. 23	
Tabela 3-Resumo dos dados sobre eficiência dos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11]. 30	
Tabela 4-Comparativo de eficiência para os circuitos com SCR e IGBT, baseados nos experimentos da Digatron. Fonte: [11]. ....	32
Tabela 5-Comparativo entre as características das tecnologias de retificação avaliadas pela <i>Power Designers</i> . Fonte: [12]. ....	33
Tabela 6-Comparativo do percentual de PbO <sub>2</sub> nas placas das baterias formadas com circuitos SCR e IGBT durante o tempo de formação, nos ensaios realizados em 04/05/2011 pela Softslim. Fonte: [13]. ....	34
Tabela 7-Consumo de energia da seção 05 de formação em 2010 e 2011. ....	44

## Lista de Abreviaturas

Ah - Amperes hora

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil;

EMI – Emissão eletromagnética;

HF - *High Frequency* (Alta frequência);

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*;

kWh - Quilowatt hora;

PP - Polipropileno;

PFC - Correção de Fator de Potência;

SCR - *Silicon Controlled Rectifier*;

THD - Distorção Harmônica Total;

UGB - Unidade Geral Básica.

## 1. Introdução

Tendo em vista a importância da geração de energia no cenário atual e sua vasta aplicação nos diversos setores da sociedade, torna-se importante estudos realizados para melhorar e otimizar a produção e o aproveitamento dessa energia para onde quer que seja destinado seu uso. Em diversos setores da sociedade, sejam eles bens e serviços, sistemas de telecomunicações, setor industrial, setor automotivo, etc., é notável a importância do uso de fontes de energia estáveis para que essas melhorias aconteçam.

O setor industrial de acumuladores de energia é o ambiente de estudo desse trabalho, por ser o acumulador uma fonte de energia estável e indispensável para diversas atividades desenvolvidas na sociedade hoje. O foco desse relatório está em estudar, relacionar e avaliar, mediante uma situação atual, as tecnologias hoje disponíveis com potencial uso no processo de formação de baterias. O estudo tomará como referência os sistemas utilizados na empresa Acumuladores Moura. O estudo visa avaliar o desempenho dos sistemas então utilizados na mencionada empresa e algumas soluções com melhorias de desempenho no que tange aos aspectos de rendimento e/ou minimização das distorções harmônicas.

O processo de fabricação de baterias de chumbo-ácido é dividido em etapas. A sequência de execução dessas etapas, na Moura, pode ser resumida no fluxograma da Figura 1. Cada etapa é desenvolvida em Unidades Gerais Básicas (UGBs) onde são executadas tarefas específicas. A Tabela 1 apresenta a divisão da unidade 01 da Moura em UGBs e as tarefas que são executadas em cada uma delas.

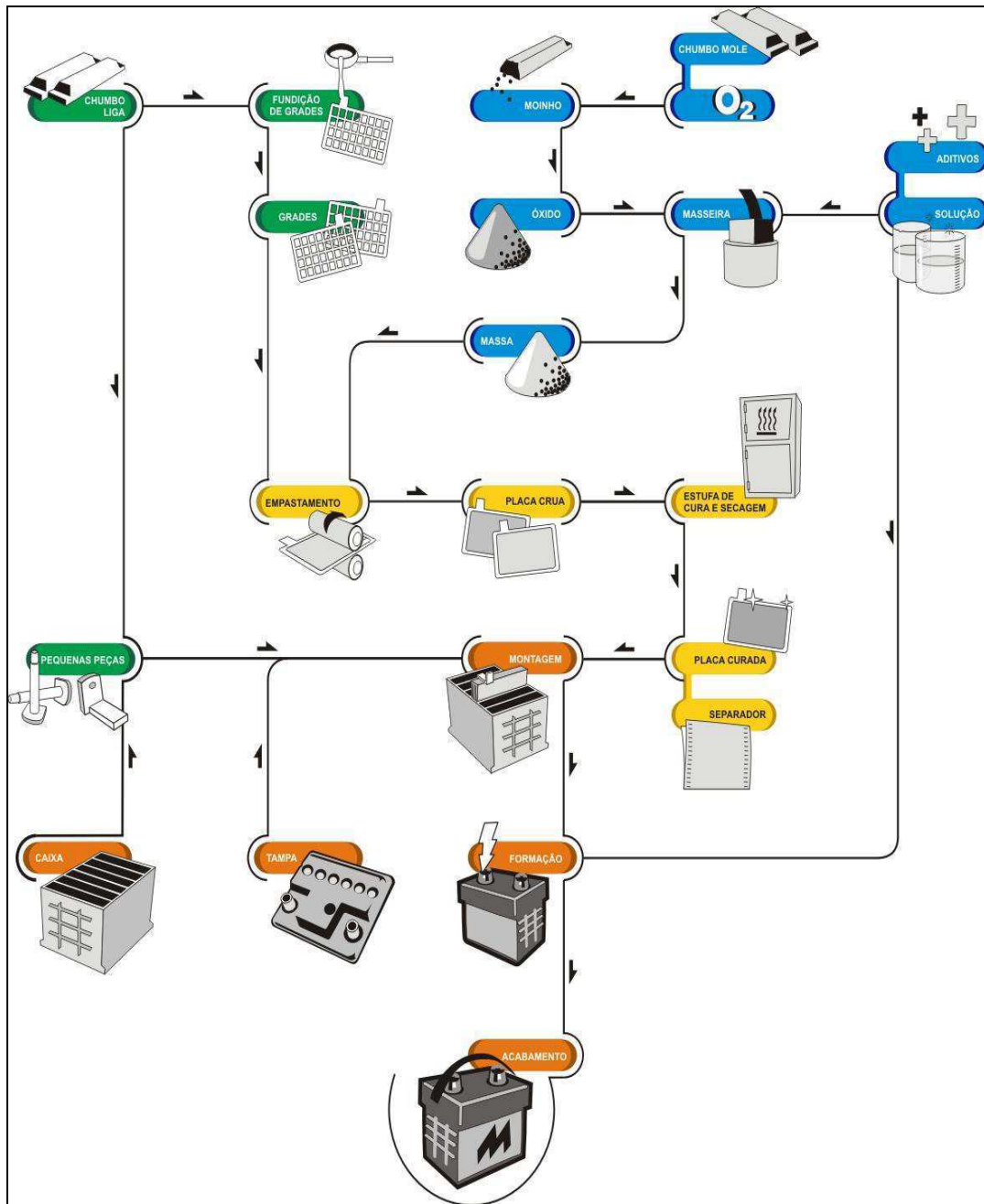


Figura 1-Fluxograma de Produção de Baterias Automotivas. Fonte: [5].

UGB-01	Moinho, fundição, empastamento e cura/secagem
UGB-02	Montagem das baterias
UGB-03	Montagem das baterias
UGB-04	Formação e acabamento de baterias

Tabela 1-Subdivisão da área fabril da unidade 01.

Todo o trabalho aqui descrito foi baseado nas atividades desenvolvidas na UGB-04, no setor de formação das baterias, Seções 05 e 06. O processo de formação da bateria e toda a descrição dos procedimentos adotados nos testes serão descritos nas próximas seções.

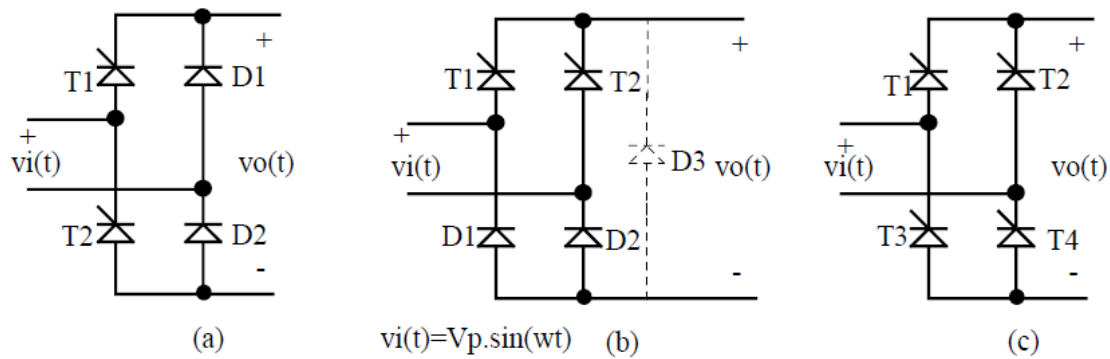
Na seção 2 é apresentada uma breve introdução sobre circuitos retificadores, além das características desses circuitos ao utilizarem tiristor ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Após a introdução sobre os retificadores e suas características, na seção 3 é feita uma descrição mais detalhada do processo de formação da bateria que ocorre na UGB-04, é mostrado o sistema de retificação atual utilizado na Moura e como é o comportamento da carga da bateria durante o processo de formação, acompanhado através do monitoramento e testes realizados no local.

Na seção 04 é apresentado um resumo das pesquisas sobre as estruturas de retificadores baseados em tiristor e IGBT de algumas empresas que desenvolvem sistemas para o mercado de acumuladores e na seção 5 são descritos os testes realizados na Moura. Com base na teoria dos circuitos retificadores e na pesquisa realizada, que apontou alguns resultados a respeito de eficiência, economia e relação custo-benefício no uso de cada tipo de tecnologia, na seção 6 é apresentada a análise desses resultados, é mostrado o perfil energético da Seção 5 de formação da Moura, onde foram realizados os testes, e é feita a avaliação dos impactos técnicos e econômicos resultantes do uso de cada uma das tecnologias nos circuitos retificadores na etapa de formação das baterias de chumbo-ácido da Moura. Na seção 7 é apresentada a conclusão do trabalho apresentando, além do resultado final da pesquisa e dos testes feitos, indicação de possíveis falhas e dificuldades durante o trabalho, além de sugestões para a continuidade do trabalho.

## **2. Introdução sobre circuitos retificadores**

O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada. No entanto, em muitas aplicações, a carga alimentada exige uma tensão contínua e a conversão da tensão alternada para tensão contínua é realizada por conversores chamados retificadores. Os retificadores podem ser classificados, de acordo com a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída, como controlados ou não controlados; de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada, como monofásico, trifásico, hexafásico, etc., ou em função do tipo de conexão dos elementos retificadores, como meia ponte ou ponte completa.

Os retificadores não controlados são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação, enquanto os controlados utilizam tiristores ou transistores. Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores em conversores estáticos e possuem vasta aplicação industrial. Na Figura 2 são mostradas três estruturas de pontes retificadoras monofásicas.



**Figura 2-Pontes retificadoras monofásicas: a) Semicontrolada assimétrica, b) Semicontrolada simétrica, c) Totalmente controlada. Fonte: [7].**

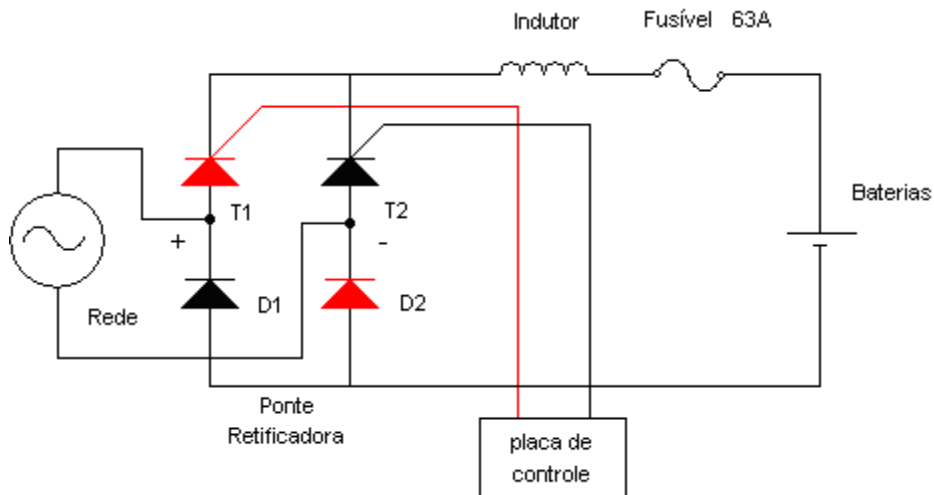
A principal vantagem das pontes semicontroladas é o uso de apenas dois tiristores, sendo seu uso indicado quando o fluxo de energia será apenas da fonte para a carga. Para esses circuitos, a tensão de saída pode assumir apenas valores (instantâneos e médios) positivos [7]. O sistema de retificação da etapa de formação das baterias na Acumuladores Moura é feito utilizando-se ponte semicontrolada simétrica com SCRs (*Silicon Controlled Rectifier*). O funcionamento do SCR será melhor detalhado na Seção 2.1.

## 2.1. SCR

O SCR (tiristor) funciona de forma semelhante ao diodo, ao permitir passagem de corrente em um único sentido. O início da sua condução é regulado por um terminal, denominado *gate* (porta), que ao receber um impulso elétrico, a depender das condições de polarização do SCR, o faz entrar em condução.

De acordo com o circuito da Figura 3 é possível observar que na Moura a alimentação vinda dos transformadores, no caso 254V fase-neutro, é retificada por uma ponte semicontrolada constituída por diodos e tiristores (SCRs). A saída da ponte retificadora é ligada a um indutor, que realiza uma amortização da corrente, diminuindo assim a variação de corrente. Há um fusível, responsável pela proteção do conjunto e do banco de baterias a serem carregadas.

A tensão e corrente médias aplicadas às baterias podem ser determinadas através do controle do ângulo de disparo dos tiristores, fazendo com que a carga das baterias seja feita de modo controlado. O instante de disparo do tiristor irá variar de acordo com a tensão e corrente médias desejadas na saída do circuito, logo, são esses os parâmetros recebidos pela placa de controle, além da temperatura interna da solução da bateria que é obtida através de uma sonda térmica, mostrada na Figura 4, que permite determinar se a tensão e corrente aplicadas à bateria estão excedendo seu limite térmico [9].



**Figura 3-Circuito retificador usando SCR na seção de formação da Moura. Fonte: [9].**



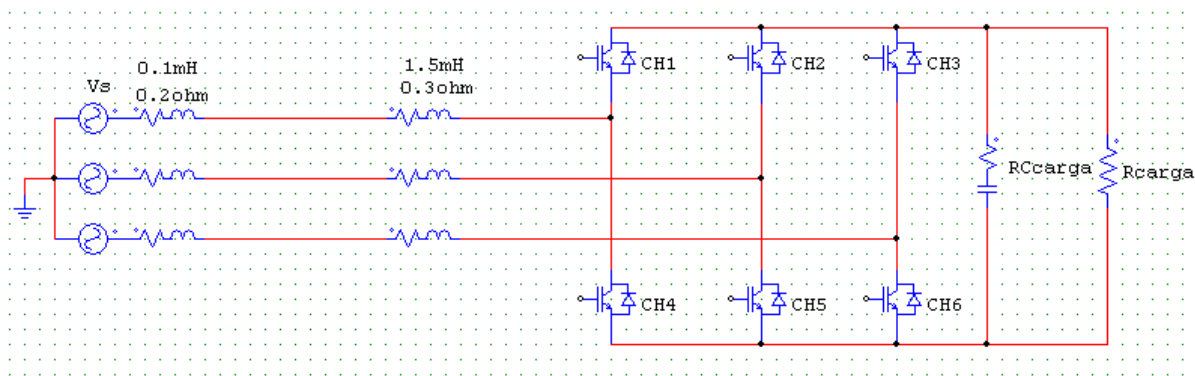
**Figura 4-Sonda de temperatura para as baterias.**

## 2.2.IGBT

Reunindo as características de comutação dos transistores bipolares de potência à elevada impedância de entrada dos MOSFET's, o IGBT se torna cada vez mais popular nos circuitos de controle de potência de uso industrial e até mesmo em eletrônica de consumo e embarcada. É um componente usado principalmente como comutador em conversores de frequência, inversores etc., e é frequentemente utilizado como uma chave, alternando os estados de condução e corte, os quais são controlados pela tensão de porta como em um MOSFET. Nestas aplicações, normalmente uma carga indutiva é ligada e desligada, fazendo com que sobre o componente surjam tensões reversas elevadas, contra as quais o dispositivo deve ser protegido. Essa proteção é feita com o uso de diodo ligado em paralelo com o

coletor e o emissor do dispositivo, para evitar que uma elevada tensão reversa seja aplicada sobre ele.

Diferentemente dos carregadores de bateria que usam SCR na etapa de retificação, os que usam IGBT podem ser chaveados à alta frequência (da ordem de kHz), possibilitando uma melhor regulação na tensão e corrente de saída [15]. Um exemplo de carregador que utiliza IGBT é mostrado na Figura 5.



**Figura 5-Retificador com IGBT.**

Observando o circuito da Figura 5 e comparando-o ao circuito da Figura 3, observa-se que, na ponte, os SCRs e diodos são substituídos por IGBTs. Esses circuitos voltarão a ser analisados nas seções 5 e 6, referentes aos testes realizados na Moura e às simulações usadas na análise técnica dos resultados dos testes e da pesquisa realizada.

### **3. Processo de formação da bateria**

A armazenagem de energia em um acumulador é possível por causa das diferentes tendências que as substâncias têm de dar ou de receber elétrons. As baterias automotivas de chumbo-ácido armazenam energia elétrica em forma de energia química convertendo-a novamente em energia elétrica quando conectada a um circuito elétrico externo.

A configuração mais simples para um acumulador seria a de uma placa negativa e uma placa positiva, separadas por um envelope poroso e imersas em uma solução de ácido sulfúrico, como mostrado na Figura 6. Este conjunto é denominado célula. As baterias são compostas por células ligadas em série, cada uma delas contendo elementos que propiciam essa conversão de energia, como eletrodos de dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ), eletrodos de chumbo metálico (Pb), eletrólito de solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), separadores de polietileno, terminais externos de chumbo, caixa e tampa de polipropileno (PP), mostrados na Figura 7 [1].



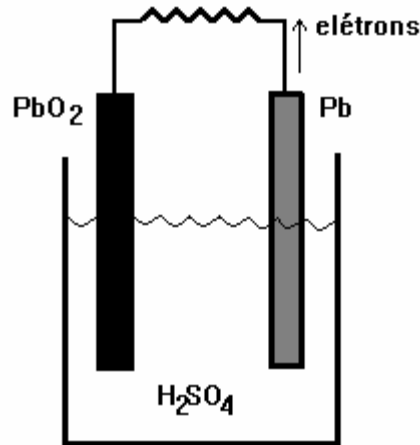


Figura 6-Esquema de uma célula de chumbo-ácido de um acumulador. Fonte: [1].

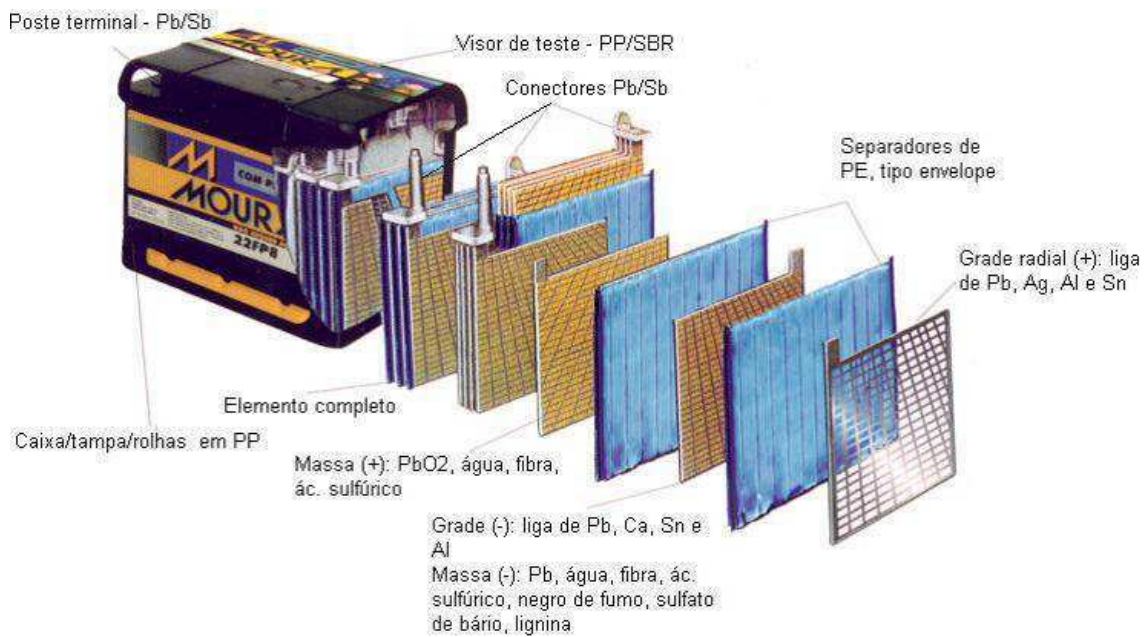
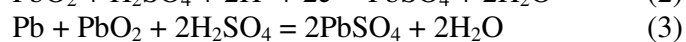
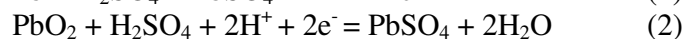
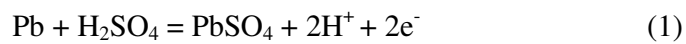


Figura 7-Componentes da bateria. Fonte: [1].

As reações que ocorrem nas células durante o processo de formação são as seguintes:



O dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) é uma substância que possui uma grande tendência de receber elétrons, enquanto o chumbo metálico ( $\text{Pb}$ ) tem uma grande tendência de doar elétrons. Assim, se colocarmos em contato o eletrodo de chumbo metálico com o eletrodo de

dióxido de chumbo e estabelecermos condições para que elétrons possam caminhar de um para outro, a transferência desses elétrons acontecerá com facilidade. Nesse caso, o chumbo metálico perde seus elétrons (1), o dióxido de chumbo irá receber esses elétrons (2) e ambos se transformam em sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ) (3). Os íons sulfato ( $\text{SO}_4$ ), necessários a essa transformação, são provenientes da solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

A carga das baterias é feita em várias fases, a primeira fase é curta e tem o objetivo de aumentar a condutividade, já que os compostos presentes na bateria ( $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{PbO}$ ) tendem a ser isolantes. Há um aumento na quantidade de corrente e no tempo das fases seguintes, onde acontece a formação da placa negativa. Já nas últimas fases, o valor de corrente é diminuído, pois a placa negativa já está formada e nesse momento necessita-se de menos energia para terminar a formação da placa positiva [2].

Ao estudar o processo de formação da bateria com o intuito de comparar duas tecnologias utilizadas nos circuitos retificadores, é necessário observar características físicas dessa bateria para que as condições de testes sejam idênticas e gerem resultados coerentes para ambas as tecnologias. Uma dessas características é a temperatura da bateria, que faz variar a corrente máxima e mínima de formação de acordo com seu valor. Uma temperatura mais alta aumenta o desempenho elétrico da bateria, porém diminui sua vida útil. Já uma baixa temperatura de formação garante uma vida útil mais longa, no entanto com perdas no desempenho elétrico. Ao atingir um valor limite, em torno de  $80^\circ\text{C}$  (Temperatura de Alarme), a bateria interrompe o processo de formação ao gerar uma corrente nula. Em valores numéricos:

$$\text{Temperatura da bateria} \leq 64^\circ\text{C} \rightarrow I_{\text{max}}$$

$$\text{Temperatura da bateria} > 64^\circ\text{C} \rightarrow I_{\text{min}}$$

$$\text{Temperatura da bateria} \geq 80^\circ\text{C} \rightarrow I = 0$$

Outra característica é o peso das placas utilizadas na montagem das baterias utilizadas nos testes. O peso dessas placas deve ter o mínimo de discrepância possível, já que a diferença de peso significa que há uma quantidade diferente de massa utilizada nas placas, o que irá alterar o tempo e o processo de formação dessas baterias fazendo com que os testes entre as tecnologias empregadas na retificação do sistema acabem não tendo parâmetros iguais de comparação.

Todo o processo de formação da bateria é acompanhado através de um *software* supervisor que monitora parâmetros como tensão, corrente, carga, Volts/Elemento, Volts/Bateria, temperatura da bateria, temperatura de dissipação da placa de controle, além de informar fase, tempo de formação e o modelo de bateria que esta sendo formada. Cada bateria tem um plano de formação específico, que varia de acordo com as especificações do cliente. Em posse dessas especificações, o encarregado de produção carrega um plano de formação que contém valores limites de tensão e temperatura que aquele tipo de bateria deve atingir durante a formação, além da quantidade de ampéres-hora estabelecido para cada fase. Todas essas informações são registradas e ficam à disposição do usuário para consultas durante todo o período de formação e depois dele. Na Figura 8 são apresentados os bancos da Seção 05 onde o processo de formação descrito anteriormente acontece.



**Figura 8-Bancos de Formação da seção 05 da formação da Moura. Fonte: [9].**

De forma resumida, a tensão que chega até as seções de formação é retificada através do SPM e entregue aos bancos de formação, onde será distribuída a todas as baterias dispostas neles. Para que haja um controle do processo, cada tipo de bateria segue um plano específico de formação, pré-inserido no sistema supervisorio, que além de registrar o comportamento das baterias durante a formação, verifica se elas estão sendo formadas de acordo com o plano, até a conclusão do processo. O sistema de retificação usado na formação e o comportamento da carga registrado pelo supervisorio durante esse período serão descritos nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

### **3.1.Sistema de Retificação**

O sistema de retificação é parte importante no processo de formação da bateria. Esse sistema utiliza retificadores compostos por pontes retificadoras semicontroladas e um microcontrolador. Esse microcontrolador se comunica com um computador, onde está instalado um *software* supervisorio que registra todas as informações durante o período de formação e pode gerar gráficos para visualização do comportamento da bateria durante esse período, além de determinar parâmetros aplicados ao conjunto de baterias que estão sendo formadas. Na Figura 14 é apresentado um exemplo de gráfico gerado pelo *software* supervisorio para um modelo específico de bateria.

O sistema de retificação utilizado é denominado Sistema Pulsante Moura (SPM) e pode ser montado tanto em um painel quanto em cavaletes. Na Figura 9 é possível observar o conjunto de módulos SPM da Seção 05 de formação da Moura, dispostos em cavaletes. O suprimento geral de energia é feito em 440V fase-fase e cada circuito é alimentado em 254V fase-neutro, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3. Na Seção 05 da formação os indutores são instalados em uma sala a parte, como mostrado na Figura 10, devido ao excesso de calor produzido por eles quando estão em funcionamento e à melhorias na forma de onda que vai até as baterias. Isto é justificado pelo fato dos indutores estarem a uma distância considerável do retificador, fazendo com que a própria impedância do cabo (que é de natureza indutiva) produza essas melhorias.



**Figura 9-Módulos SPM instalados na seção 05 de formação da Moura.**



a)



b)

**Figura 10-(a) Indutor, (b) Sala de indutores da seção 05 da formação. Fonte: [9].**

Após o estudo do sistema de retificação usado durante a formação, foi feita uma análise da carga da bateria durante esse processo. Na seção 3.2 são apresentados os resultados dessa análise, mostrando em detalhes o comportamento da carga da bateria durante seu processo de formação.

### **3.2.Comportamento da carga durante a formação**

Para um conhecimento mais abrangente do processo de formação das baterias, após a análise do sistema de retificação foi feito um estudo do comportamento da carga das baterias durante esse processo. Esse estudo se torna importante quando se deseja comparar a



eficiência no uso de diferentes tecnologias no sistema de retificação, já que é através dele que são feitos os modelos matemáticos do sistema, que podem ser usados posteriormente para gerar uma modelagem para simulações e testes, onde as características inerentes a cada tecnologia e sua eficácia no uso dos sistemas de retificação também poderão ser analisadas.

Para extrair os dados relacionados à carga das baterias foi instalado o analisador de grandezas elétricas *PowerNET* da *IMS Power Quality* (Figura 11) nos circuitos SPM da Seção 05 da formação, como apresentado na Figura 12. O *PowerNET* é um medidor e registrador portátil de grandezas elétricas, que em conjunto com o seu *software* analisador P-600 permite analisar graficamente as medições realizadas e gerar relatórios de acordo com a resolução 505 da ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil) [10].



**Figura 11-Analisador de grandezas elétricas PowerNET P-600. Fonte: [10].**



**Figura 12-Analisador de grandezas elétricas instalado na seção 05 de formação.**

O medidor foi instalado com o objetivo de armazenar as grandezas elétricas durante todo o período de formação de baterias para que fosse possível observar o comportamento da carga. Foram feitas algumas medições com modelos de baterias diferentes, mas devido a maior disponibilidade de fabricação do modelo MI60GD, este foi usado como padrão nos testes.

De acordo com o plano de formação da bateria, o analisador era instalado no início da formação e seu período de amostragem era programado para que fosse possível armazenar a maior quantidade de dados possível até o final do período de formação, levando em consideração o tamanho da memória interna do equipamento. A programação foi iniciada pelo plano de formação (carga) apresentado na Figura 13. A carga da bateria foi realizada no circuito 5613 da Seção 05 da formação e dividida em dez etapas. O comportamento da carga durante a formação pode ser resumido pelo gráfico apresentado na Figura 14. Através dessa figura é possível observar que durante o período de pausa, determinado no plano de formação, a corrente se torna nula, voltando a elevar-se após esse período, comportamento que também é observado na quantidade de volts por elemento da bateria. Na Figura 14 também é possível observar a curva de variação da quantidade de ampéres hora da bateria, sempre crescente, exceto no período de pausa, onde também não há variação.

Plano de carga usado no processo										
Circuito: 5613 Plano: MI60GD - Início em: 30/mai/2011 as 18:07:29										
Fase	CMD	Nominal	Min.	Param.1	Param.2	Término	Unid.	Temper.	Alarme	Comentários
1	Pausa					30	Min.			
2	Carga	3.2	0.2			1	Ah	68	80	
3	Carga	5.8	2.8			2	Ah	68	80	
4	Carga	9.5	6.5			4	Ah	68	80	
5	Carga	12.6	9.6			7	Ah	68	80	
6	Carga	17.3	14.3			41	Ah	68	80	
7	Carga	21.0	18.0			89	Ah	68	80	
8	Pausa					30	Min.			
9	Carga	16.5	13.5			143	Ah	63	80	
10	Carga	15.0	12.0			217	Ah	63	80	

Figura 13-Plano de carga para bateria MI60GD.

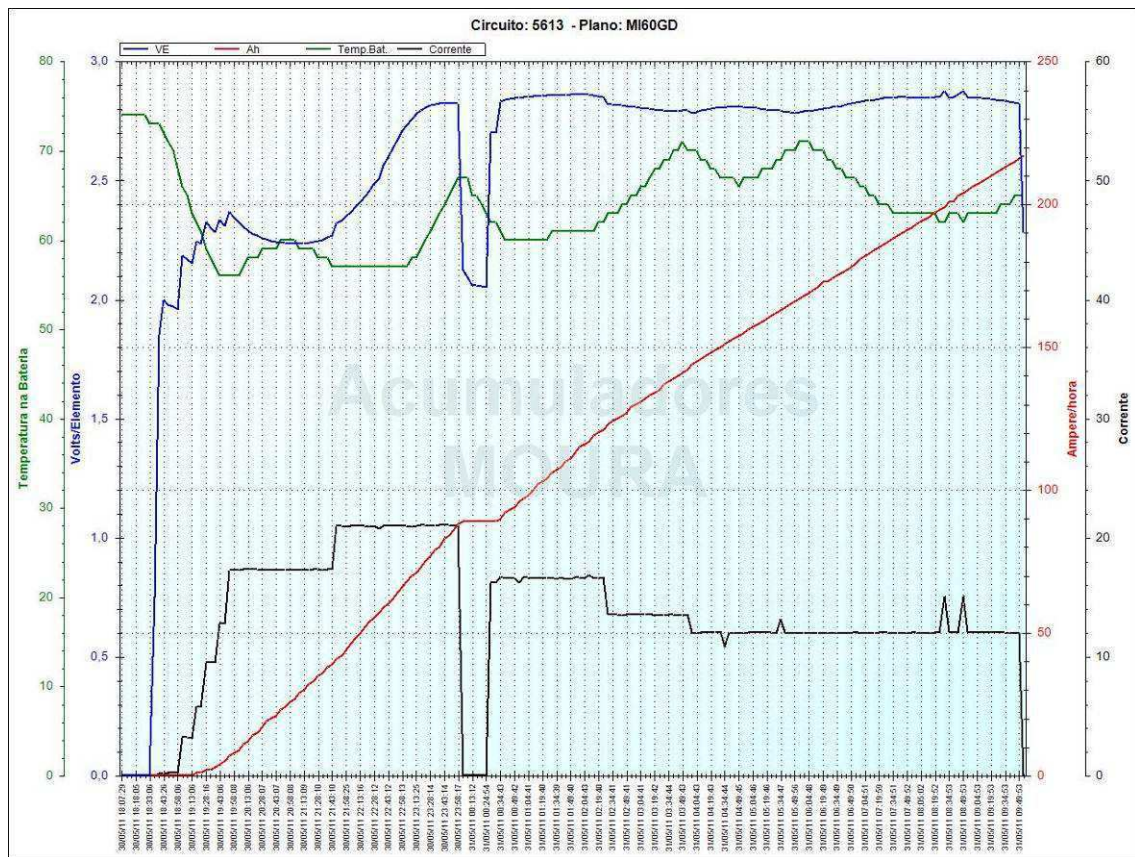


Figura 14-Gráfico do comportamento da carga da bateria MI60GD durante a formação, gerado pelo software supervisor.

Outros dados gerados pelo *software* do PowerNET são os valores das grandezas elétricas durante o período de formação da bateria. Os valores médio, máximo e mínimo dessas grandezas e o instante em que ocorreram podem ser visualizados no relatório simplificado gerado pelo *software* e que é apresentado na Tabela 2 de forma resumida. Os valores de corrente e potência só são obtidos para uma fase, por isso as grandezas elétricas para duas das fases do sistema aparecem com valor nulo. O relatório simplificado completo



também traz, além dos valores limites de variação da tensão, informações sobre o circuito, a duração do período de formação, o intervalo de amostragem e a quantidade de registros obtidos.

TABELA RESUMIDA				
Grandeza	Mínimo	Horário	Máximo	Horário
Tensão 1	410,1 V	31/05/2011 às 07:40:00:00	439,2 V	30/05/2011 às 19:10:00:00
	410,6 V	31/05/2011 às 07:50:00:00	439,2 V	30/05/2011 às 18:50:00:00
	410,3 V	31/05/2011 às 08:10:00:00	438,8 V	30/05/2011 às 19:00:00:00
Tensão 2	407,7 V	31/05/2011 às 08:00:00:00	437,6 V	30/05/2011 às 19:10:00:00
	407,6 V	31/05/2011 às 08:10:00:00	437,0 V	30/05/2011 às 18:50:00:00
	407,4 V	31/05/2011 às 07:40:00:00	436,7 V	30/05/2011 às 19:00:00:00
Tensão 3	405,9 V	31/05/2011 às 08:00:00:00	435,2 V	30/05/2011 às 19:10:00:00
	405,4 V	31/05/2011 às 08:10:00:00	435,5 V	30/05/2011 às 18:50:00:00
	405,9 V	31/05/2011 às 07:40:00:00	434,8 V	30/05/2011 às 19:00:00:00
Médias Fases (1,2,3)	422,5 V1	420,3 V2	418,7 V3	
Corrente 1	0,00 A	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,00 A	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,00 A	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 19:00:00:00
Corrente 2	0,00 A	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,00 A	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,00 A	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,00 A	30/05/2011 às 19:00:00:00
Corrente 3	0,00 A	31/05/2011 às 00:20:00:00	36,80 A	30/05/2011 às 22:20:00:00
	0,00 A	30/05/2011 às 18:50:00:00	37,10 A	30/05/2011 às 22:10:00:00
	0,00 A	31/05/2011 às 00:10:00:00	37,30 A	30/05/2011 às 22:00:00:00
Médias Fases (1,2,3)	0,00 A1	0,00 A2	25,66 A3	
Potência 1	0,000 kW	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,000 kW	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,000 kW	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 19:00:00:00
Potência 2	0,000 kW	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,000 kW	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,000 kW	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,000 kW	30/05/2011 às 19:00:00:00
Potência 3	0,000 kW	31/05/2011 às 00:20:00:00	8,140 kW	30/05/2011 às 23:50:00:00
	0,000 kW	30/05/2011 às 18:50:00:00	8,119 kW	30/05/2011 às 23:40:00:00
	0,000 kW	31/05/2011 às 00:10:00:00	8,062 kW	30/05/2011 às 23:30:00:00
VA 1	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,000 kVA	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 19:00:00:00
VA 2	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:40:00:00
	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:50:00:00
	0,000 kVA	30/05/2011 às 19:00:00:00	0,000 kVA	30/05/2011 às 19:00:00:00
VA 3	0,000 kVA	31/05/2011 às 00:20:00:00	8,930 kVA	30/05/2011 às 22:20:00:00
	0,000 kVA	30/05/2011 às 18:50:00:00	9,051 kVA	30/05/2011 às 22:00:00:00
	0,000 kVA	31/05/2011 às 00:10:00:00	8,986 kVA	30/05/2011 às 22:10:00:00
cos(Fi) 1	0,000	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000	* às *
	4,000	* às *	0,000	* às *
	4,000	* às *	0,000	* às *
cos(Fi) 2	0,000	30/05/2011 às 18:40:00:00	0,000	* às *
	4,000	* às *	0,000	* às *
	4,000	* às *	0,000	* às *
cos(Fi) 3	0,818	30/05/2011 às 21:00:00:00	0,943	30/05/2011 às 23:50:00:00
	0,000	30/05/2011 às 18:50:00:00	0,932	30/05/2011 às 23:20:00:00
	0,826	30/05/2011 às 20:30:00:00	0,951	31/05/2011 às 01:30:00:00
W Total	5,7 kW			
VA Total	6,2 kVA			
VAr Total	2,5 kVAr			
cos(Fi) Total	0,912			
Energia Ativa Direta	83,905 kWh	Energia Ativa Reversa	0,000 kWh	
Energia Indutiva Direta	37,193 kVAh	Energia Indutiva Reversa	-1,40195275191207E1	
Energia Capacitiva	0,000 kVAh	Energia Capacitiva Reversa	0,286kVAh	

Tabela 2-Tabela resumida com as grandezas elétricas, contida no relatório simplificado gerado pelo software analisador P-600 referente ao plano de carga mostrado na Figura 13.



Com o *software* que acompanha o PowerNET foi possível realizar análises mais específicas a respeito do comportamento da carga da bateria, bem como do funcionamento do sistema durante esse período. A análise desses dados é importante para o desenvolvimento da modelagem do sistema além de servir como critério de avaliação quando da comparação das tecnologias avaliadas no circuito de retificação utilizado. Os resultados obtidos são expostos junto da análise técnica na seção 6.

#### 4. Estudos de retificadores baseados em SCR e IGBT desenvolvidos por empresas para o mercado de baterias automotivas

Tendo em vista que parte da motivação para a realização da pesquisa realizada nesse trabalho surgiu do questionamento de alguns clientes da Acumuladores Moura quanto às tecnologias usadas no sistema de retificação da empresa, comparando àquelas utilizadas por outras empresas do mesmo ramo, parte da pesquisa foi direcionada a estudar essas tecnologias. Buscou-se resultados de testes que apresentassem vantagens ou desvantagens significativas do uso de IGBTs nos sistemas de retificação em vez do uso de SCRs, tecnologia atualmente usada na Moura. Foi feito um levantamento das empresas que tem trabalhos desenvolvidos com semicondutores para sistemas de retificação e pedido que elas enviassem resultados de seus testes para que uma avaliação inicial pudesse ser feita. Os resultados obtidos pelas empresas que foram contatadas nortearam os testes realizados na Moura e definiram os parâmetros que deveriam ser analisados nessa etapa. Esses resultados serão abordados e discutidos nessa seção e na seguinte.

A tecnologia tradicional SCR usa controle do ângulo de fase para regular a saída CC. De acordo com os estudos da empresa Digatron [11], há uma correlação direta entre fator de potência e a tensão de saída. Quando a tensão da série de baterias é baixa com relação ao valor nominal na saída, o fator de potência também será menor. Com o aumento dessa tensão, o fator de potência melhora numa relação quase linear. Esse comportamento pode ser observado na Figura 15.

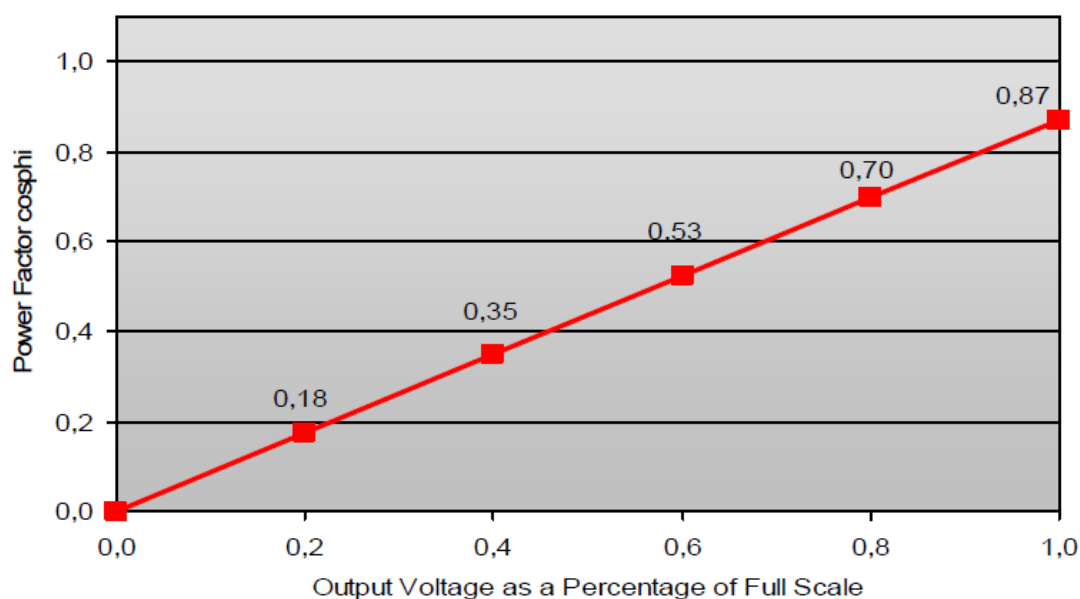
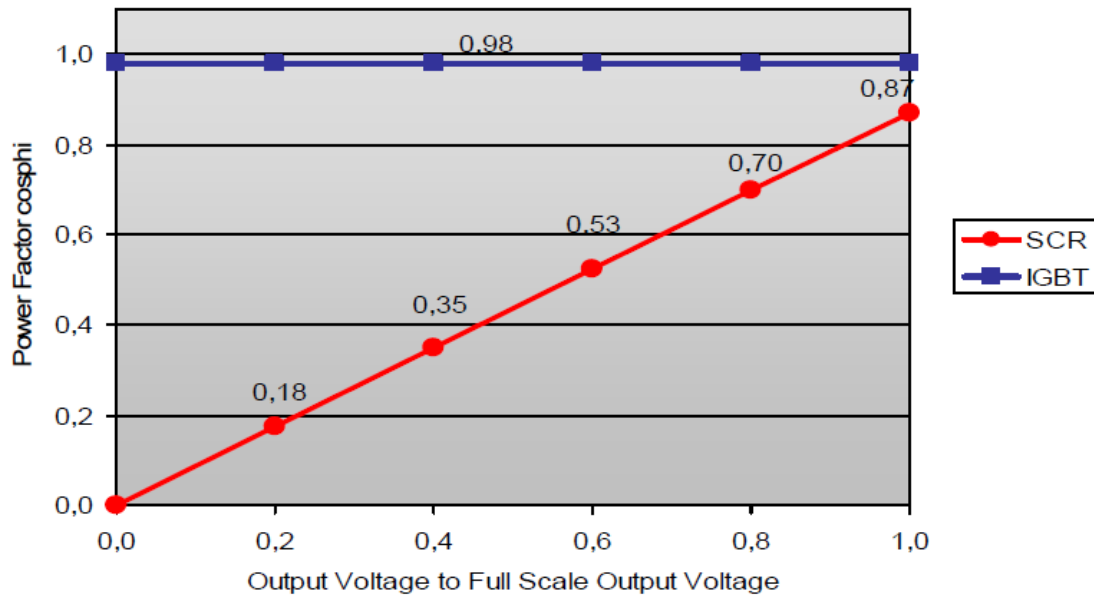


Figura 15-Fator de potência do SCR em relação à tensão de saída como uma porcentagem da tensão nominal. Fonte: [11].

A tecnologia de controle de ângulo de fase requer potência reativa, que deve ser compensada com equipamento de correção de fator de potência (PFC). Os retificadores baseados em SCR introduzem harmônicos indesejáveis na linha de potência CA que devem ser considerados na especificação do equipamento PFC. Já a tecnologia de modo de chaveamento baseada em IGBT usa modulação por largura de pulso para regular a saída CC. Outra característica dos circuitos com IGBT é a baixa ondulação de corrente na saída e o fator de potência constante em 0,98, aproximadamente, durante todo o intervalo de saída, como pode ser verificado no gráfico apresentado na Figura 16.



**Figura 16-Comparativo entre o fator de potência nos circuitos com SCR e IGBT em relação à razão entre tensão de saída e nominal. Fonte: [11].**

Outro fator avaliado pela Digatron que tem grande influência na etapa de retificação do processo de formação é a distorção harmônica. Na Figura 17 são mostrados os harmônicos individuais para circuitos SCR e IGBT, sendo o 5º o 7º e o 11º harmônicos os mais importantes, que devem ser considerados na especificação do equipamento de correção de fator de potência.

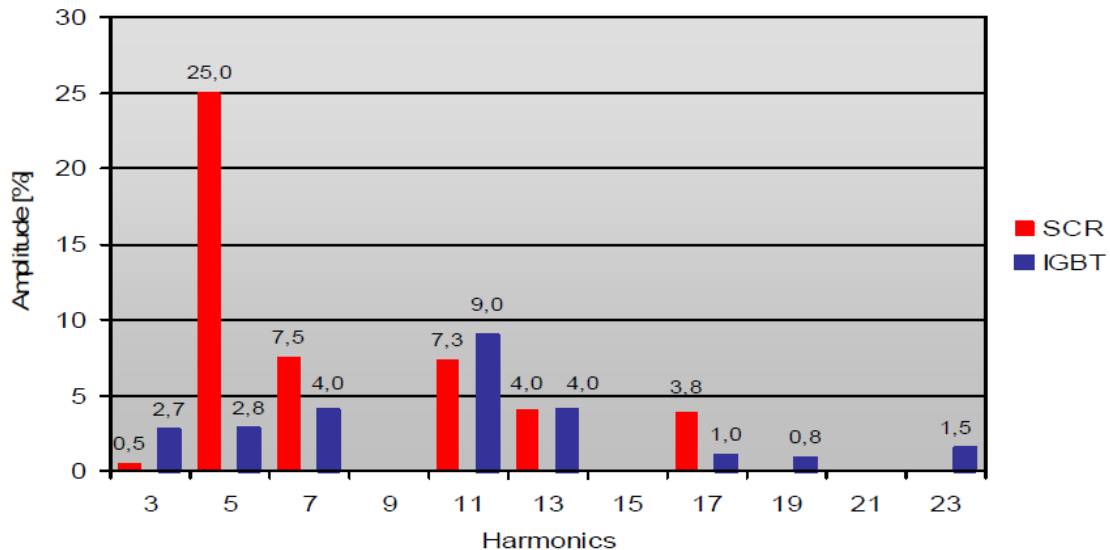


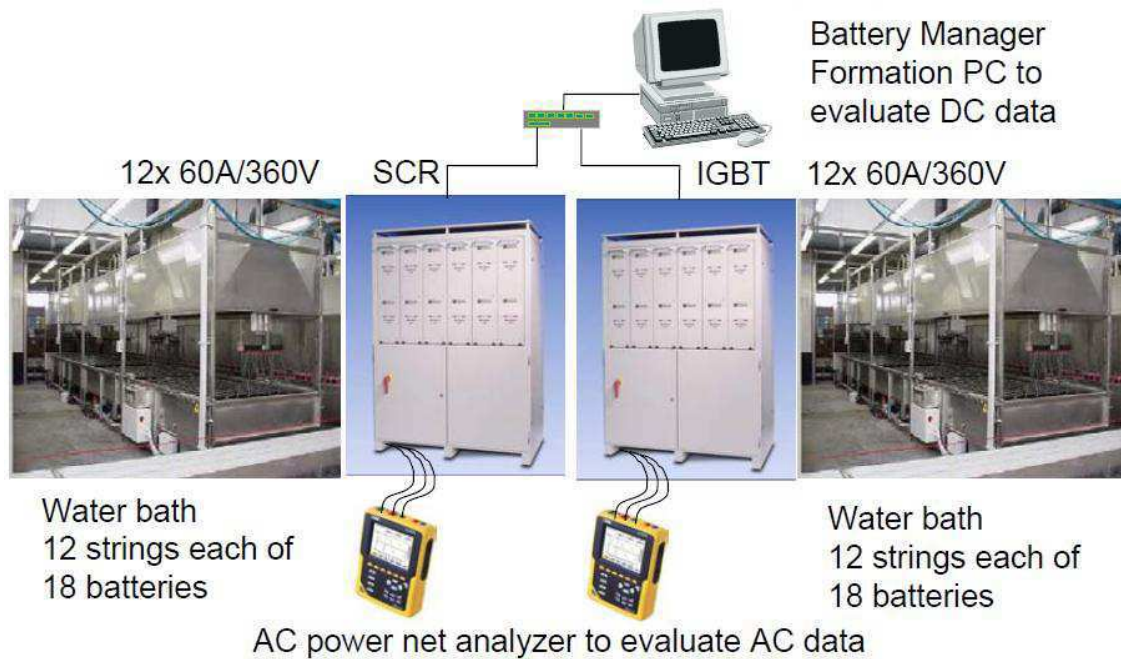
Figura 17-Comparativo da distorção harmônica individual nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte:[11].

As subseções seguintes trazem de forma mais detalhada os resultados dos testes realizados pelas empresas contatadas e suas respectivas conclusões a respeito da comparação entre as duas tecnologias. A seção 4.1 traz os resultados dos testes realizados pela Digatron, que das empresas contatadas foi a que enviou a maior quantidade de detalhes da realização dos seus experimentos e a seção 4.2 traz os resultados das outras empresas, a *Power Eletronics* e a *Softslim*, única empresa brasileira dentre elas.

#### 4.1. Resultados da *Digatron firing circuits*

Os experimentos realizados pela Digatron foram definidos como descrito abaixo e montados de acordo com o esquema apresentado na Figura 18. Para cada tipo de bateria os processos começaram ao mesmo tempo e com programas idênticos.

- Um processo de formação foi iniciado com baterias de caminhão modelo DIN EN 630xx (130 Ah), otimizadas para testes *cold cranking* (partida a frio) usando:
  - 6 circuitos de carga SCR 60A/360V, cada circuito com 18 baterias, e
  - 6 circuitos de carga IGBT 60A/360V, cada circuito com 18 baterias.
  
- Um processo de formação foi iniciado com baterias de caminhão modelo DIN EN 640xx (140 Ah), otimizadas para teste de ciclo de vida, usando:
  - 6 circuitos de carga SCR 60A/360V, cada circuito com 18 baterias, e
  - 6 circuitos de carga IGBT 60A/360V, cada circuito com 18 baterias.



**Figura 18-Experimento realizado pela Digatron para avaliar os dados CA nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].**

Um analisador *power net* trifásico foi conectado à entrada CA do retificador SCR e outro foi conectada à entrada CA do retificador IGBT. O analisador foi usado para avaliar dados CA para potência real, potência reativa, fator de potência e distorção harmônica total (THD). Um *software* gerenciador de bateria instalado em computador também foi usado para controlar o processo de formação e avaliar todos os dados CC e a temperatura do eletrólito. Os resultados desses testes são mostrados a seguir.

O gráfico da Figura 19 representa o comportamento da potência de saída CC gerada pelo regime de carga definido pelo editor do programa de monitoramento da bateria. Esse comportamento é idêntico para ambos os circuitos com SCR e IGBT. Quando o comportamento da potência da saída CC é comparado com o comportamento da potência de entrada CA é possível observar, na Figura 20, que as perdas com a tecnologia IGBT são insignificantes.

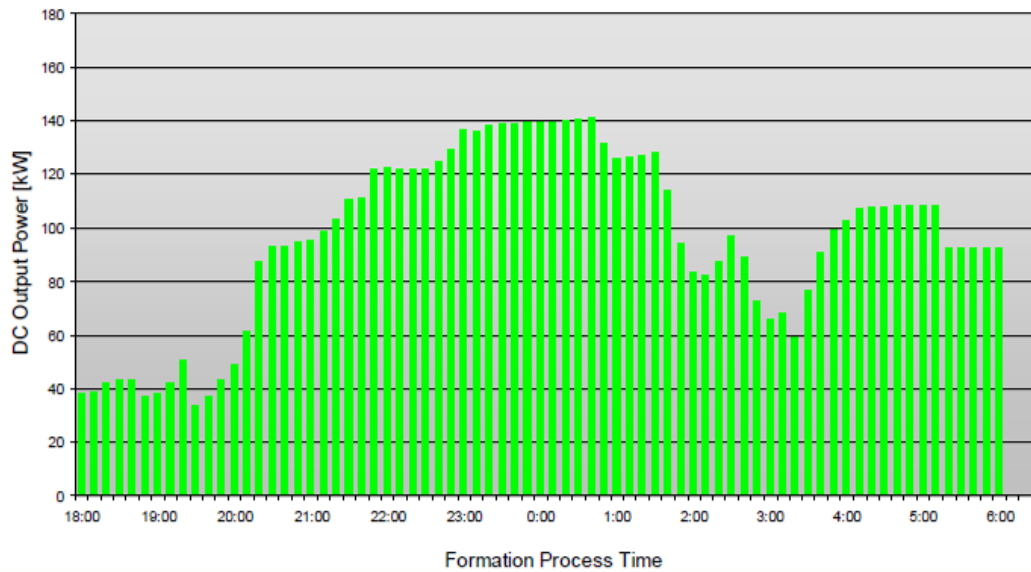


Figura 19-Comportamento da potência de saída durante o processo de formação. Fonte:[11].

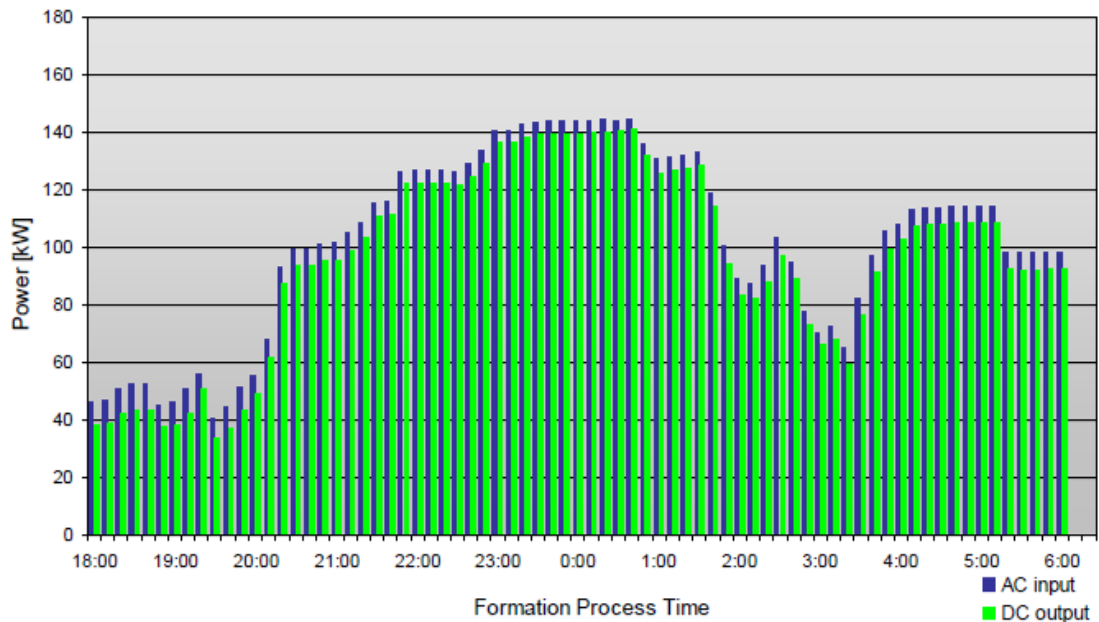


Figura 20-Comparação da potência de saída CC com a potência de entrada CA no circuito com IGBT. Fonte: [11].

Quando é feita uma comparação do perfil da potência de entrada CA do circuito com IGBT com o perfil da potência de entrada do circuito com SCR é possível observar vantagem adquirida na eficiência quando usada a tecnologia IGBT. Esse resultado pode ser observado na Figura 21. Na Figura 22 também é possível observar a grande quantidade de potência reativa, em adição à potência real, consumida pelos circuitos SCR e que irá requerer correção especial do fator de potência. Em seguida é apresentado um resumo comparativo com os resultados dos testes de eficiência durante o período de formação.

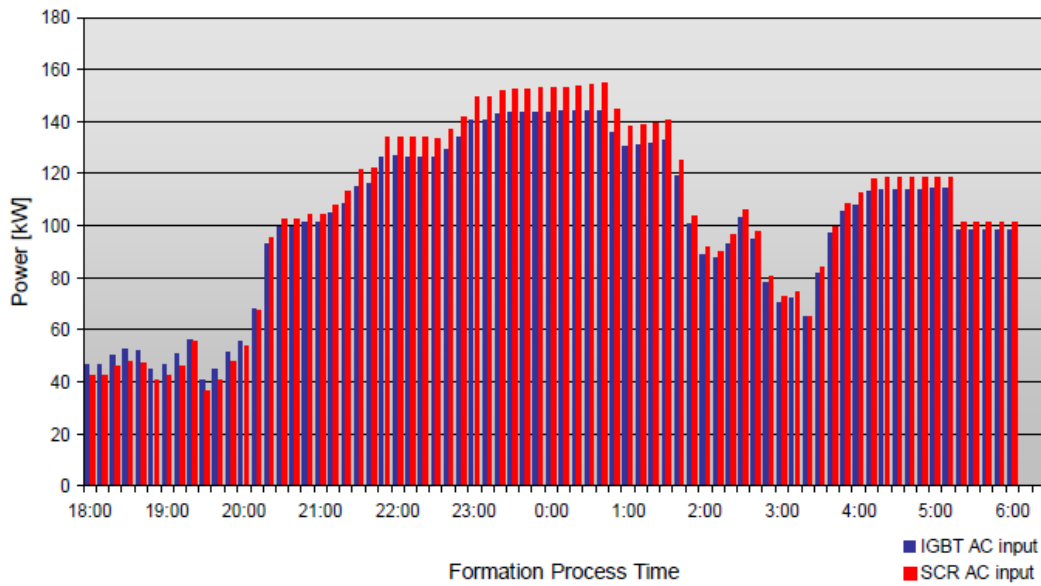


Figura 21-Comparação entre a potência de entrada CA dos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].

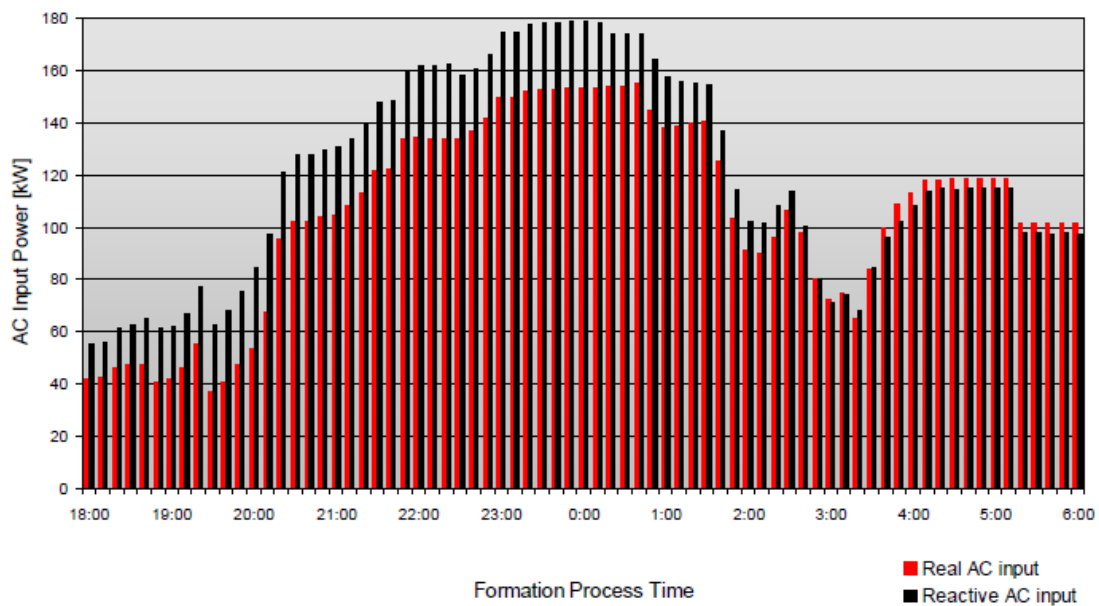


Figura 22-Comparação entre a potência real de entrada CA e a potência reativa de entrada do circuito com SCR. Fonte: [11].

➤ Resultados de eficiência com SCR:

- Durante o período de formação de 12 horas a energia acumulada nas baterias foi 1170 kWh e a energia real consumida foi 1283 kWh, resultando em uma eficiência média de 91,2%.
- A eficiência mínima de 89,9% ocorre apenas durante a fase inicial de formação quando a tensão de série da bateria e as correntes de carga são baixas.
- Alta eficiência acontece na máxima potência de saída CC.

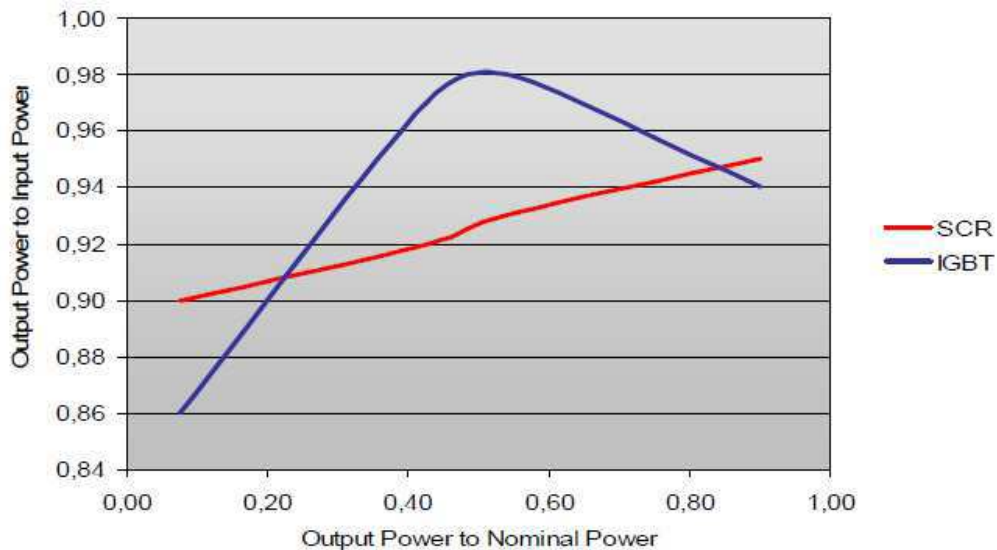
➤ Resultados de eficiência com IGBT:

- Durante o período de formação de 12 horas a energia acumulada nas baterias foi 1170 kWh e a energia real consumida foi 1242 kWh, resultando em uma eficiência média de 94,2%.
- A eficiência mínima de 85,5% ocorre apenas durante a fase inicial de formação quando a tensão de série da bateria e as correntes de carga são baixas.
- Alta eficiência acontece quando a tensão de série da bateria esta em torno de 50% e a corrente em torno de 75% da saída nominal.
- A eficiência máxima de 97,6% foi registrada à 262V e 44,75A.

Pelo fato de a potência reativa ser bem pequena, ela não foi compensada ou não foi considerada nos cálculos que geraram os resultados com IGBT. Já no caso do SCR, a potência reativa é alta e deve ser compensada. A ineficiência associada com a compensação de PFC não foi considerada nesse cálculo. Um resumo desses resultados é mostrado na Tabela 3 e no gráfico da Figura 23, onde é possível observar que os circuitos com IGBT são até 5% mais eficientes que os circuitos com SCR.

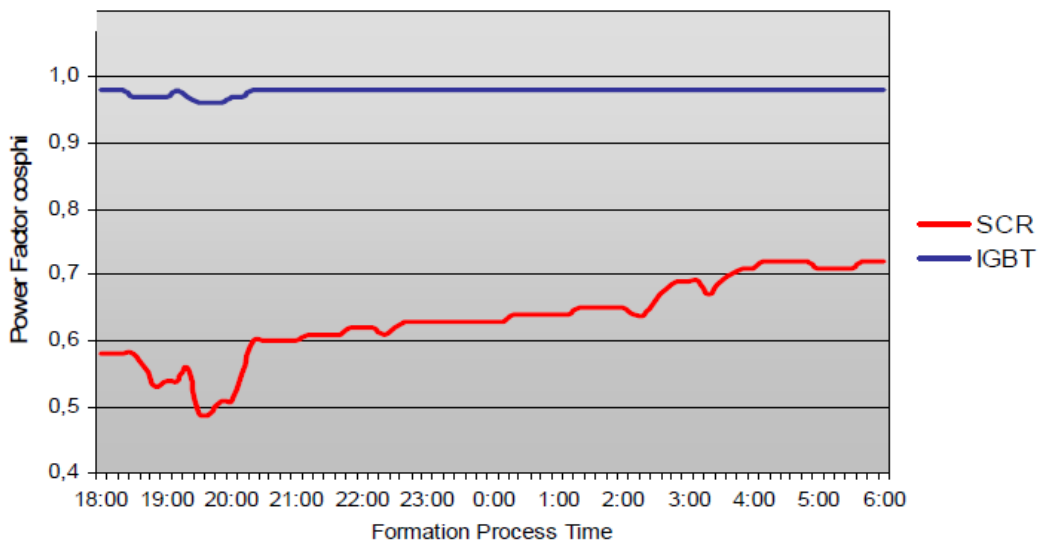
SCR		
	Entrada CA	Saída CC
<b>Pot. Real</b>	1283 kWh	1170 kWh
<b>Pot. Reativa</b>	1450 kvarh	91,2%
Eficiência SCR (%)		
<b>Mínima</b>	<b>Média</b>	<b>Máxima</b>
89,9	91,2	94,6
IGBT		
	Entrada CA	Saída CC
<b>Pot. Real</b>	1242 kWh	1170 kWh
<b>Pot. Reativa</b>	262 kvarh	94,2%
Eficiência IGBT (%)		
<b>Mínima</b>	<b>Média</b>	<b>Máxima</b>
85,5	94,2	97,6

Tabela 3-Resumo dos dados sobre eficiência dos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].



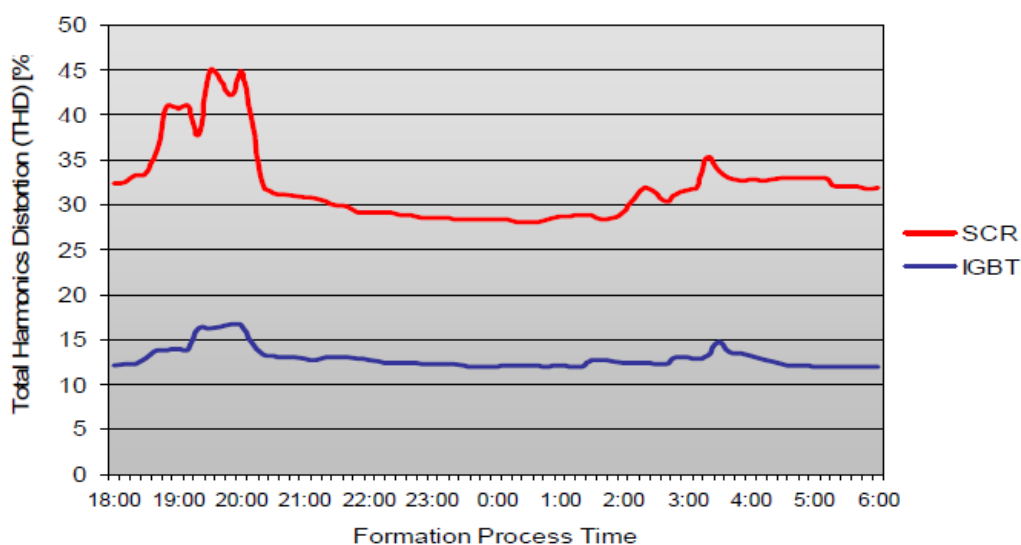
**Figura 23-Eficiência no uso de circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].**

No gráfico apresentado na Figura 24 é feita uma comparação entre a medição do fator de potência nos circuitos com SCR e IGBT durante todo o processo de formação. O fator de potência para o circuito com IGBT é significativamente maior do que com circuitos SCR, apresentando um valor médio de 0,98 enquanto este apresenta um valor médio de 0,66. A medição da distorção harmônica total (THD) para cada tecnologia durante as 12 horas do processo de formação também é apresentada no gráfico da Figura 25.



**Figura 24-Comparação do fator de potência durante o processo de formação nos circuitos com SCR e IGBT. Fonte: [11].**





**Figura 25-Comparativo do THD durante o processo de formação para os circuitos com SCR e IGBT.**  
**Fonte: [11].**

Baseado nos resultados expostos, a Digatron concluiu que os circuitos SCR consumirão 3,8% mais energia que um circuito IGBT durante o processo de formação. Esse resultado pode ser observado na Tabela 4.

Nominal DC power	SCR: 259,2 kW	IGBT: 259,2 kW
DC energy	1.170 kWh	1.170 kWh
Real AC energy	1.283 kWh	1.242 kWh
Rectifier efficiency	91,2 %	94,2 %
Efficiency losses due to PFC 10W/kvar * 130 kvar	-0.5 %	not required
Total efficiency	90,7 %	94,2 %
Total AC energy	1.290 kWh	1.242 kWh
Energy cost difference	+3,8 %	

**Tabela 4-Comparativo de eficiência para os circuitos com SCR e IGBT, baseados nos experimentos da Digatron. Fonte: [11].**

Outra conclusão é que não há diferença significativa entre os circuitos SCR e IGBT relacionada à geração de calor durante a formação e também relacionada ao desempenho da bateria. Esses resultados indicam que não há vantagens significativas para o uso de SCR ou IGBT quando se está considerando fatores-chave incluindo controle do processo, qualidade ou vida útil da bateria, mas há diferenças quando se relaciona aspectos financeiros.

#### **4.2. Resultados da SoftSlim e Power Designers**

Outra empresa que compartilhou os resultados dos seus testes foi a *Power Designers* [12]. De acordo com seus estudos, os sistemas carregadores de bateria que usam a tecnologia SCR tem um desempenho limitado, com eficiência e fator de potência baixos, alta ondulação CA com aumento da temperatura da bateria, além de ser susceptível à distúrbios na linha CA [12]. Já a tecnologia IGBT apresenta alta eficiência, em torno de 92%, que gera diminuição de 10% a 20% nas contas de energia e baixo consumo de corrente CA, além de redução de até 50% na demanda da potência de pico. Na Tabela 5 é apresentado um resumo das características avaliadas pela *Power Designers* para as tecnologias ferro ressonantes, SCR e de alta frequência (HF) onde está inclusa a tecnologia IGBT.

<b>CRITERIA</b>	<b>FERRO</b>	<b>SCR</b>	<b>HF</b>
Efficiency	Medium	Low - Medium	<b>High</b>
Power Factor	Medium	Low	<b>High</b>
Impact of AC Disturbances	High	Medium	<b>Low</b>
AC Voltage / Current Ripple	Medium	High	<b>Very Low</b>
Battery Temperature Rise	Medium - High	Medium	<b>Low</b>
Charging Capability	Single Voltage	Single Voltage	<b>Multi Voltage</b>
Temperature Compensation	None	Optional	<b>Integrated</b>
Battery Sizes / Chemistry	One size, only flooded	One / Multi-size, flooded / sealed	<b>Multi-size &amp; chemistry</b>
Size and Weight	Large / Heavy	Large / Heavy	<b>Small / Light</b>
Noise	Very Audible	Audible	<b>Non Audible</b>

**Tabela 5-Comparativo entre as características das tecnologias de retificação avaliadas pela *Power Designers*. Fonte: [12].**

Uma empresa brasileira que trabalha com IGBT, a SoftSlim, também foi contatada e enviou alguns resultados dos testes realizados com o carregador e formador de baterias micro controlado fabricado por eles. As características desse carregador são descritas abaixo [13]:

- Alimentação: 220V ou 380V trifásico;
- Saída: 311Vcc pulsada ou 556 Vcc pulsada;
- Capacidade 16 a 17 baterias em série em 220V até 30 ampères, de 27 até 30 baterias em 380V até 30 amperes.

Trata-se de um controlador micro controlado parametrizável em quatro passos, sendo um de descanso, ajuste de tempo e corrente, controle para redução de corrente no horário de pico, calculador de Ah para maior eficiência da carga, alarme em caso de interrupção de carga (ex. cabo rompido ou bateria com defeito) e uma memória retentiva, que garante não ser necessário reprogramar o controlador, caso haja falta de energia, quando esta for reestabelecida. Segundo os testes realizados pela empresa, o módulo com IGBT apresenta [13]:

- Alto fator de potência (1.0), eliminando a necessidade de instalação de bancos capacitivos;
- Baixo EMI (emissão eletromagnética) com alto fator de economia de energia elétrica (até 30%, baseado nos carregadores atuais);
- Fácil manutenção e transporte, já que é montado em módulos individuais, facilmente desmontáveis e de troca rápida.

Outra característica avaliada pela SoftSlim foi o impacto da tecnologia IGBT na performance das placas formadas, usando baterias formadas por retificadores com SCR como padrão de comparação e avaliação. Foram produzidas 12 baterias R55 com peso conhecido, sendo 8 amostras para avaliar a evolução da formação e 4 amostras para ensaios elétricos [13]. Os resultados são apresentados na Tabela 6 e no gráfico da Figura 26, onde o percentual de  $PbO_2$  existente nas placas da bateria é usado como critério de avaliação da velocidade de formação, já que a quantidade de dióxido de chumbo aumenta a medida que a bateria é formada.

CARREGADOR	TEMPO DE FORMAÇÃO			
	16 h	18 h	20 h	22 h
TIRISTORES	89,7%	90,0%	96,2%	-
IGBT	90,0%	96,6%	98,0%	-

Tabela 6-Comparativo do percentual de  $PbO_2$  nas placas das baterias formadas com circuitos SCR e IGBT durante o tempo de formação, nos ensaios realizados em 04/05/2011 pela Softslim. Fonte: [13].

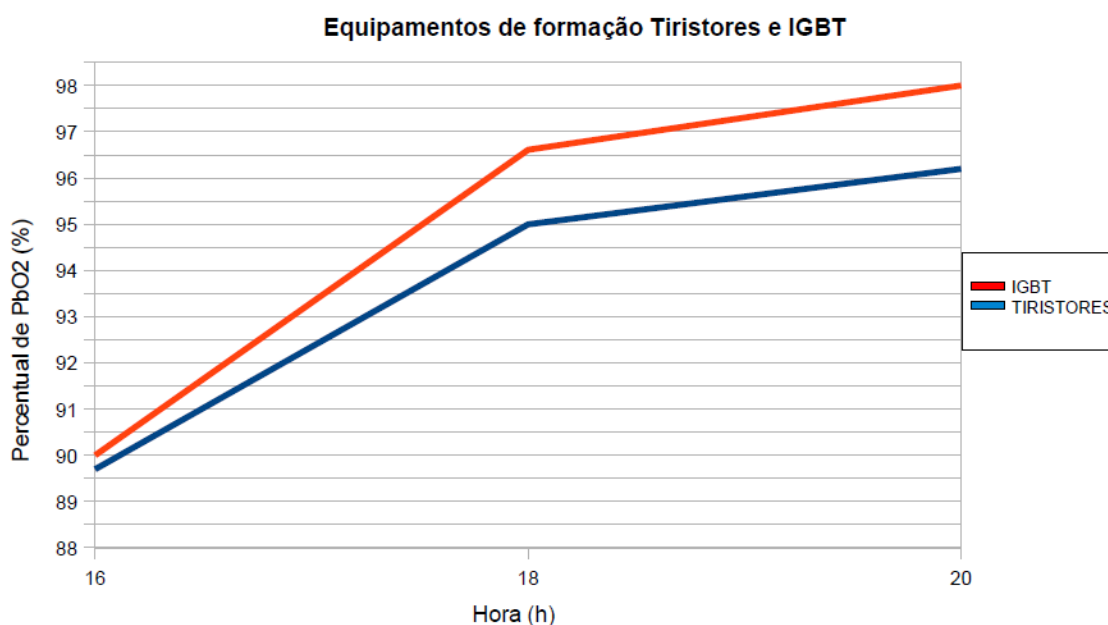


Figura 26-Gráfico comparativo da evolução da formação quando usado circuitos com SCR e IGBT nos ensaios realizados em 04/05/2011. Fonte: [13].

Ao analisar o gráfico da Figura 26 e a Tabela 6 é possível observar uma melhoria na performance da formação das placas quando usado os carregadores com IGBT. Esse resultado é comprovado quando se percebe um maior percentual de  $PbO_2$  em um tempo de formação menor para esse carregador.

## **5. Testes realizados**

As medições feitas com o PowerNET na Seção 05 de formação, com o intuito de se conhecer o comportamento da carga durante o período de formação, serão expostas nessa seção. Todas foram realizadas com a bateria automotiva de 60Ah MI60GD, escolhida por ser o tipo mais disponível nas linhas de produção da fábrica. Por questão de organização, nessa seção serão expostos apenas os resultados de algumas das medições feitas e que são mais relevantes na análise das tecnologias avaliadas.

Um resumo do comportamento da carga durante a formação nas medições realizadas no dia 30/05/2011 na Moura é mostrado na tabela resumo do relatório simplificado, exposto na Tabela 2. Esses valores também podem ser visualizados através dos gráficos gerados pelo *software* analisador P-600 e são mostrados abaixo, nas Figuras 27, 28, e 29.

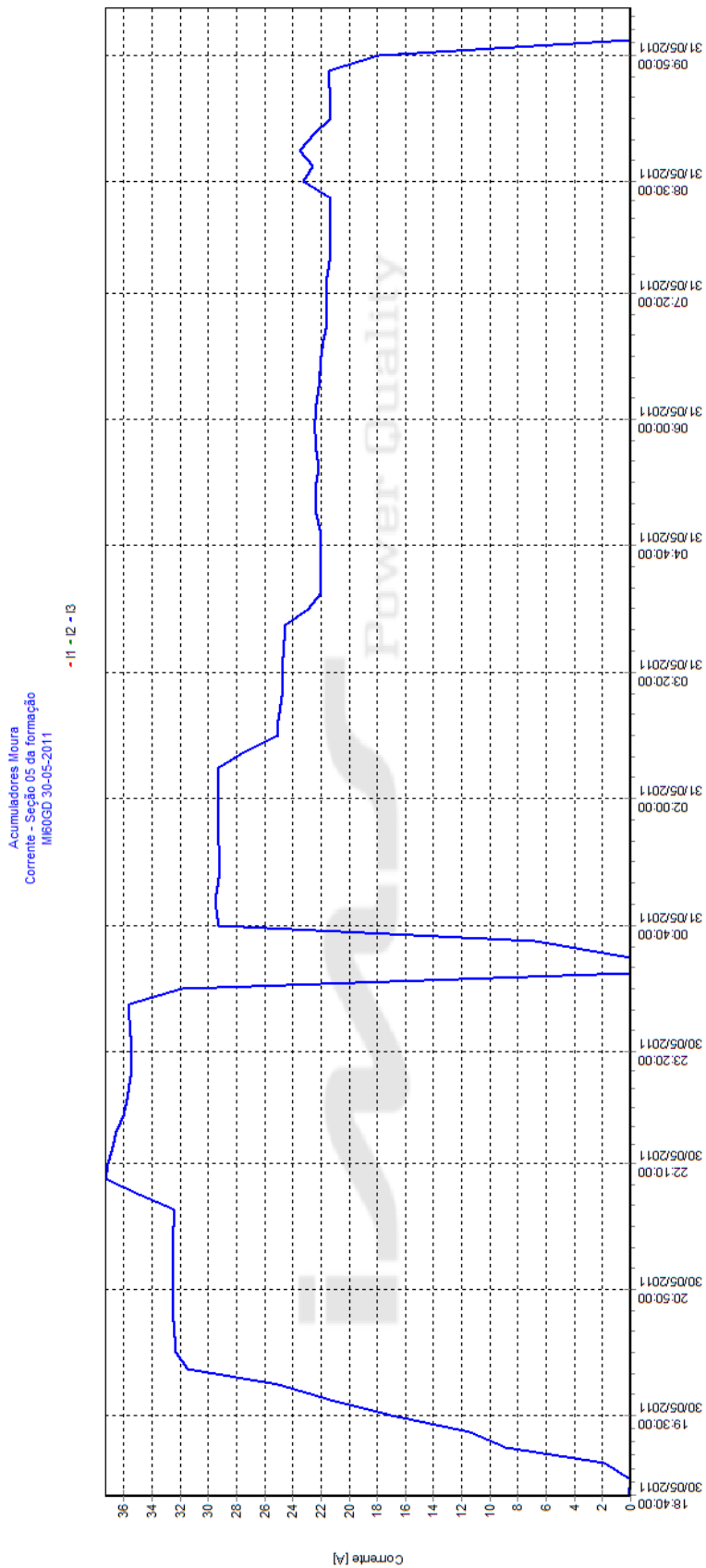


Figura 27-Gráfico de corrente, medição de 30/05/2011.

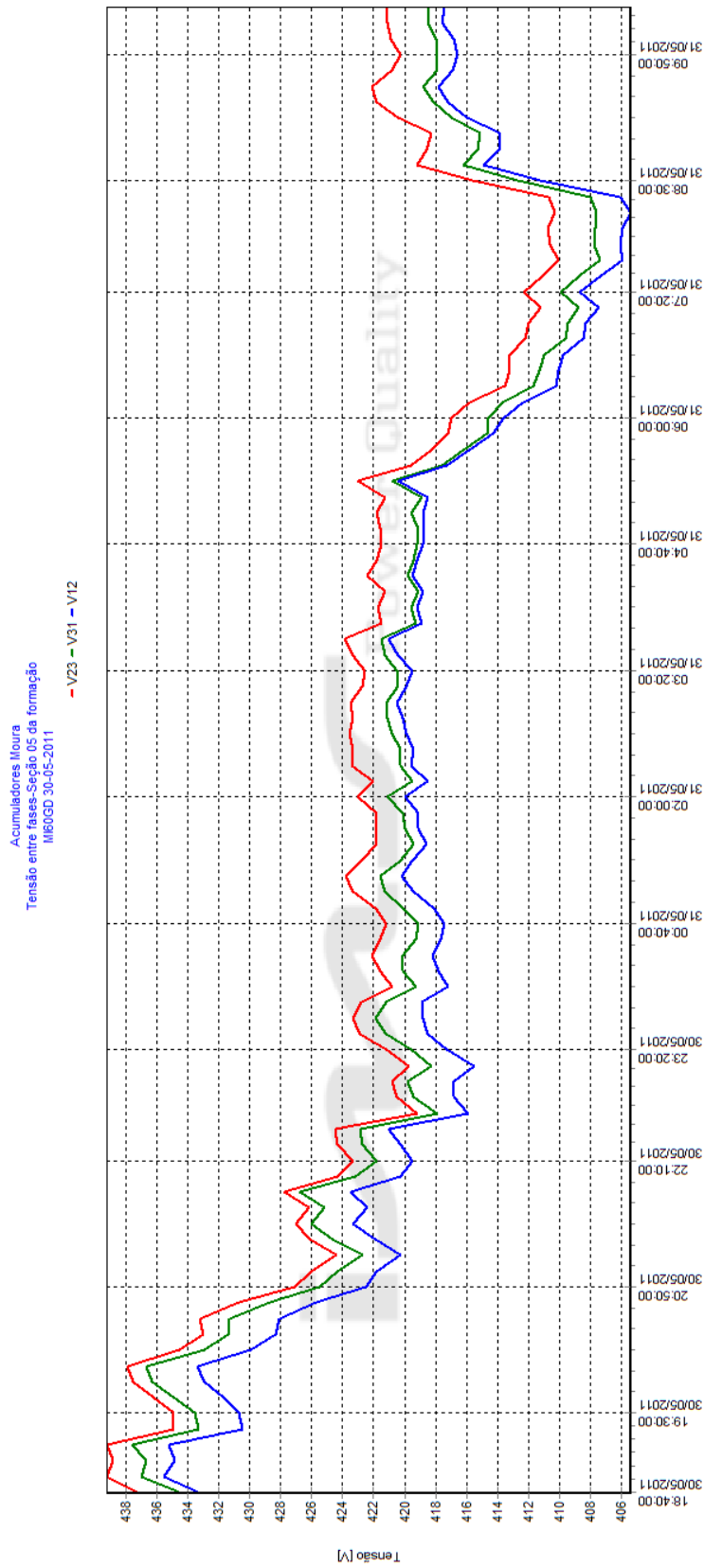


Figura 28-Gráfico da tensão entre linhas, medição de 30/05/2011.

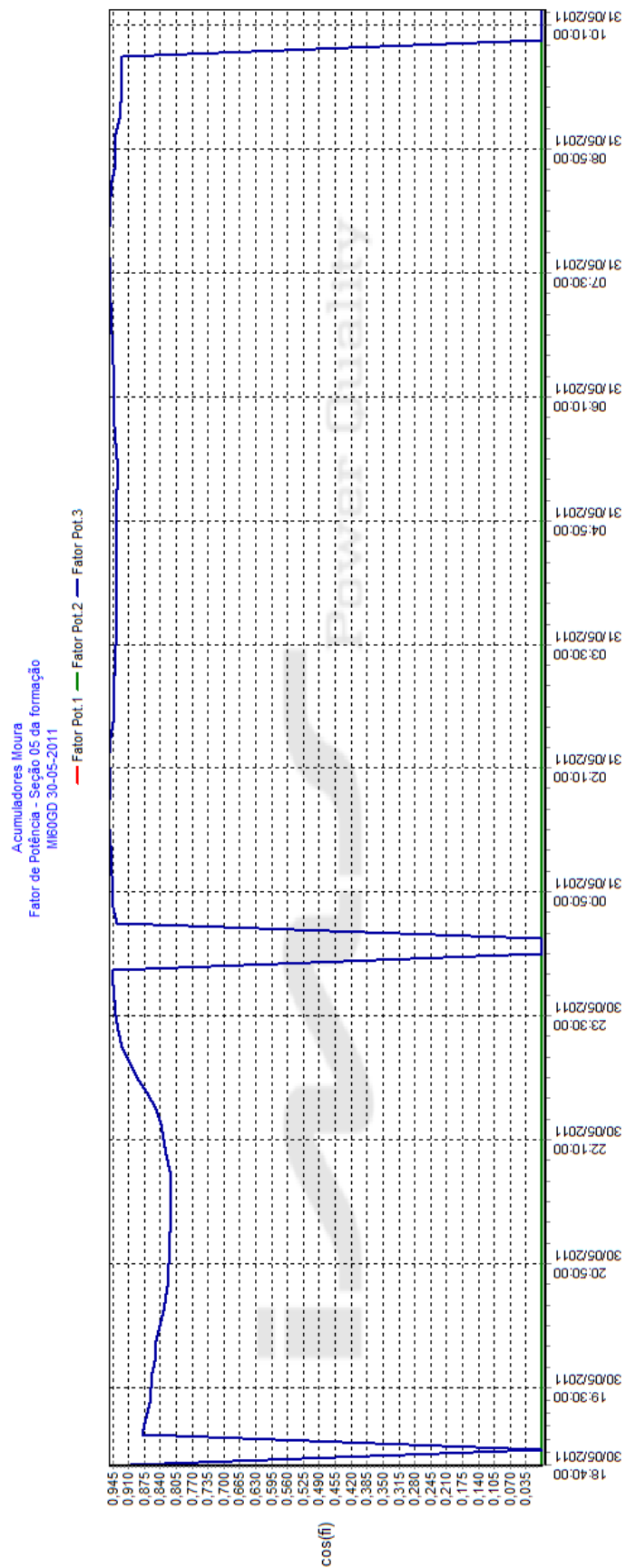


Figura 29-Gráfico do fator de potência, medição de 30/05/2011.

De acordo com os resultados apresentados na seção 4, um dos parâmetros mais citados como diferencial entre o uso da tecnologia SCR e a IGBT entre as empresas pesquisadas foi o valor do fator de potência do sistema. Como é possível observar nos gráficos mostrados anteriormente, referentes às medições feitas na Seção 05 de formação, o fator de potência com o uso do SCR apresentou um valor mínimo em torno de 0,82, que não foi tão baixo quanto o referenciado nos resultados dos testes da Digatron, por exemplo, que tinha um valor de aproximadamente 0,6. Uma análise das possíveis causas para esta discrepância nos resultados aponta para a influência de algum equipamento usado para redução dos harmônicos e compensação dos reativos, que também melhoraria o fator de potência. Esses resultados podem ser confirmados na seção 6.2 onde são feitas simulações baseadas no circuito retificador com SCR instalado na Moura com e sem a influência de um filtro ativo. A adição do filtro ativo no circuito altera os valores de THD e de fator de potência, tornando-os compatíveis com aqueles apresentados pelas empresas na seção 4, podendo ser esse o fator responsável pelas discrepâncias encontradas.

Em seguida, também são apresentados os resultados das medições do THD de tensão e corrente e dos harmônicos na Seção 05 da formação, respectivamente nas Figuras 30, 31 e 32. Na seção 6 será feita a análise técnica dos testes realizados e os resultados obtidos, usados para a avaliação das tecnologias citadas nesse trabalho, e dos seus usos nos sistemas de retificação.



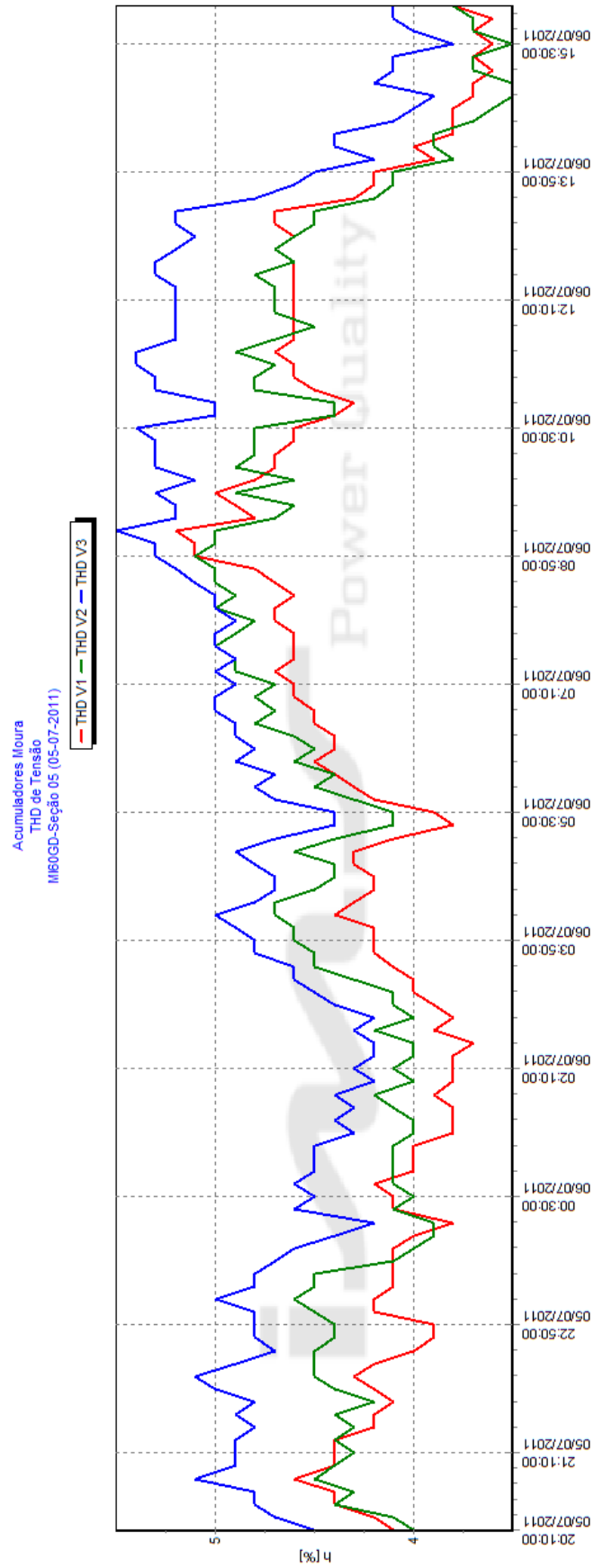


Figura 30-THD de tensão, medição realizada em 05/07/2011.

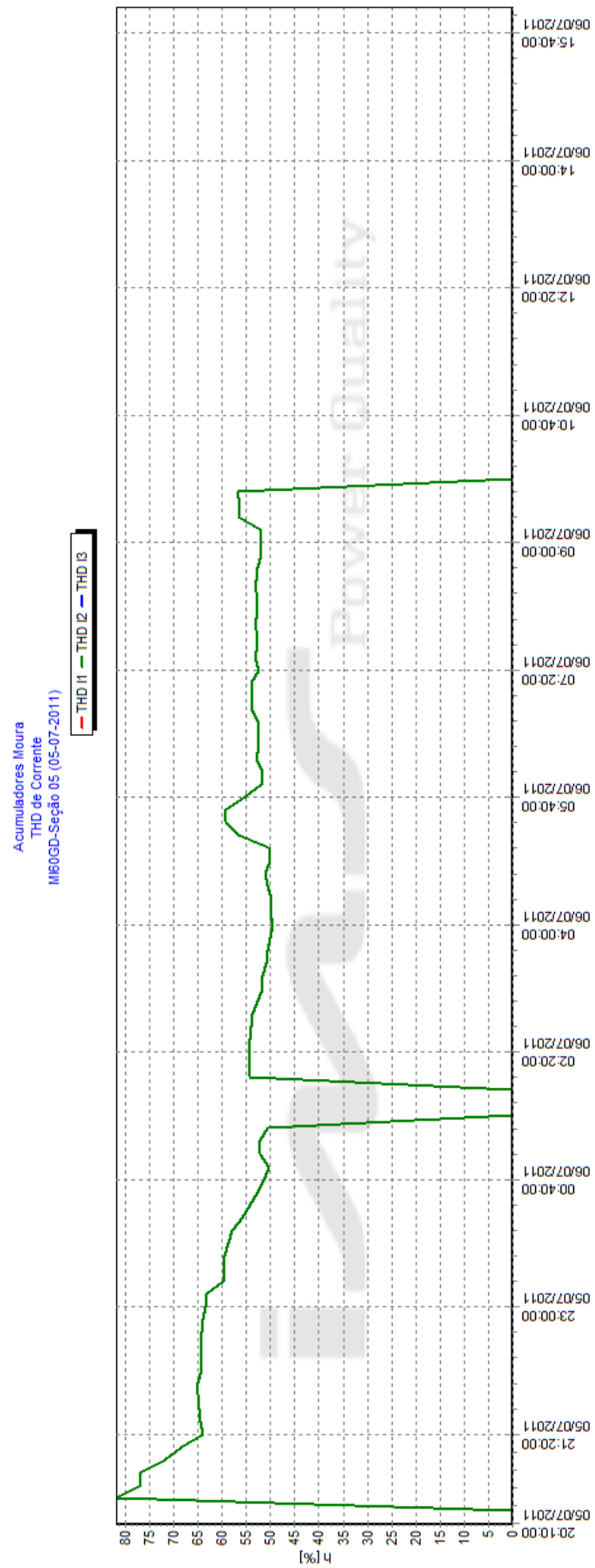


Figura 31-THD de corrente, medição realizada em 05/07/2011.

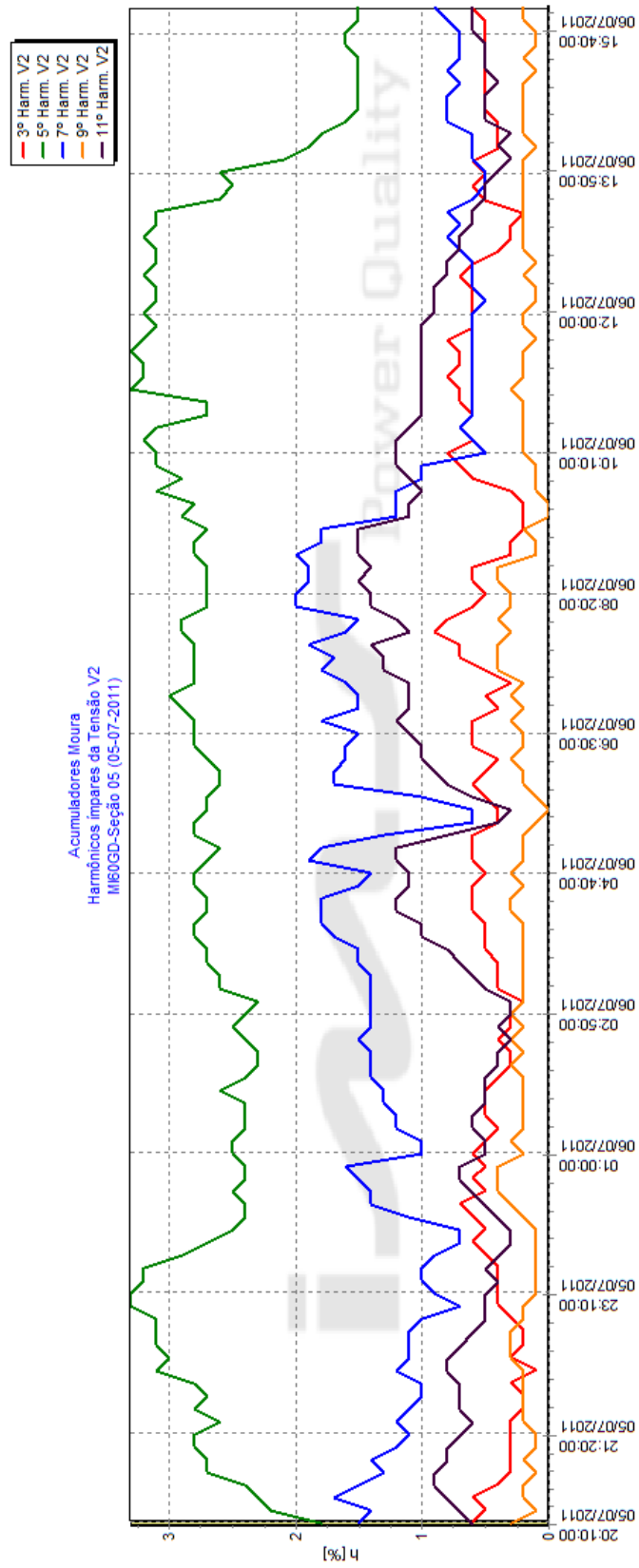


Figura 32-Harmônicos ímpares da tensão V2, medição realizada em 05/07/2011.

## **6. Avaliação dos impactos técnicos e econômicos dos circuitos retificadores na Acumuladores Moura**

Baseado nos resultados expostos na seção 4 pelas empresas contatadas e nos testes realizados na Moura e descritos na seção 5, será feita uma avaliação do uso das tecnologias no sistema de retificação. Para dar embasamento teórico e prático, e para que fosse conhecido o cenário onde esses testes foram realizados foi feita uma análise energética da Seção 05 de formação, além de simulações feitas com o *software* PSIM para avaliar os resultados anteriormente discutidos. A avaliação dos impactos técnicos e econômicos dos circuitos analisados é exposta nas subseções que seguem e também são usados como referência para a conclusão desse trabalho, na seção 7.

### **6.1. Análise energética da Seção 05 da formação**

Com o estudo dos impactos causados pelo tipo de tecnologia empregada no sistema de retificação, feito anteriormente, notou-se que a economia de energia é um fator relevante a ser observado. Sabendo da importância que é o custo da energia no processo de formação, para a Acumuladores Moura foi feito um levantamento do consumo de energia na Seção 05 de formação da Unidade 01 da fábrica, para que na avaliação dos impactos técnicos e econômicos dos circuitos testados, pudesse ser feita uma medição do quanto se economizaria ao utilizar outra tecnologia de retificação. Os dados referentes ao consumo de energia elétrica na Seção 05 de formação serão mostrados a seguir.

Para que se tenha uma ideia do montante de energia elétrica consumida pela fábrica e o quanto é importante um estudo com base na eficiência energética, tendo em vista uma redução dos custos, é apresentado um histórico de consumo de energia da fábrica de 2009 a 2010 e as metas traçadas para 2011:

- 2009
  - Consumo médio 2.585MW
  - Custos com energia não utilizada R\$ 445.649,00
  
- 2010
  - Consumo médio 2.957MW (aumento de 14%)
  - Custos com energia não utilizada R\$ 64.329.00
  
- 2011
  - Meta de Consumo médio 3.224MW (aumento de 9%)
  - Meta de custos com energia não utilizada R\$ \*ZERO

Tendo em vista as metas para 2011, algumas das ações definidas pela equipe de gerenciamento de energia para que elas fossem cumpridas abrangem o setor de formação, já que esse setor é responsável por uma grande parcela nos gastos com energia elétrica na fábrica. Uma dessas ações está relacionada à recuperação das sondas de temperatura (Figura 4) dos bancos de formação, para que elas possam indicar com clareza a temperatura durante o processo de carga, evitando níveis excessivos, o que acarretaria em carga ineficiente e diminuição da vida útil da bateria.

Na Tabela 7 são apresentados, para os meses de 2010 e de 2011 até abril, os valores totais de consumo mensal de energia elétrica na subestação que abastece a seção 05 de formação. É necessário fazer uma observação quanto ao consumo referente ao mês de abril de 2011, que apresentou um resultado bem inferior à média mensal dos outros meses devido ao dia da obtenção dos dados ter sido anterior ao final do mês, e também por causa de operações realizadas na Seção que necessitaram de cancelamento do fornecimento de energia no local.

Período	Consumo de energia (kWh)
Janeiro de 2010	239.320,3
Fevereiro de 2010	251.123,6
Março de 2010	317.511,2
Abril de 2010	346.616,9
Mai de 2010	411.450,0
Junho de 2010	456.421,0
Julho de 2010	195.523,1
Agosto de 2010	383.083,1
Setembro de 2010	400.885,4
Outubro de 2010	395.805,6
Novembro de 2010	370.551,1
Dezembro de 2010	335.022,0
Janeiro de 2011	378.834,3
Fevereiro de 2011	422.126,3
Março de 2011	518.331,0
Abril de 2011	47.573,4

**Tabela 7-Consumo de energia da seção 05 de formação em 2010 e 2011.**

As Figuras 34 e 35, obtidas por meio do Relatório anual de consumo ativo, mostram o consumo ativo de energia na Seção 05 da formação no ano de 2010 e de 2011 até o mês de junho, resultado coerente com o exposto na Tabela 7.

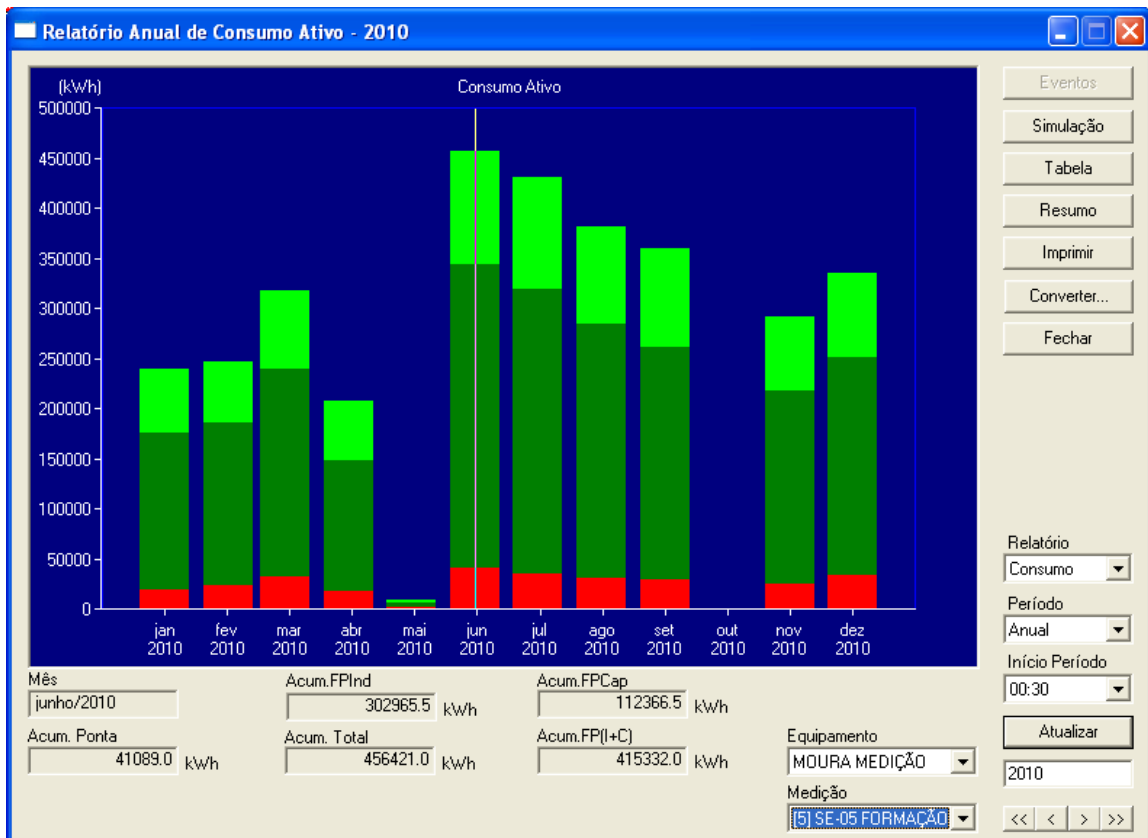


Figura 33-Gráfico do relatório Anual de Consumo Ativo de 2010 da Acumuladores Moura.

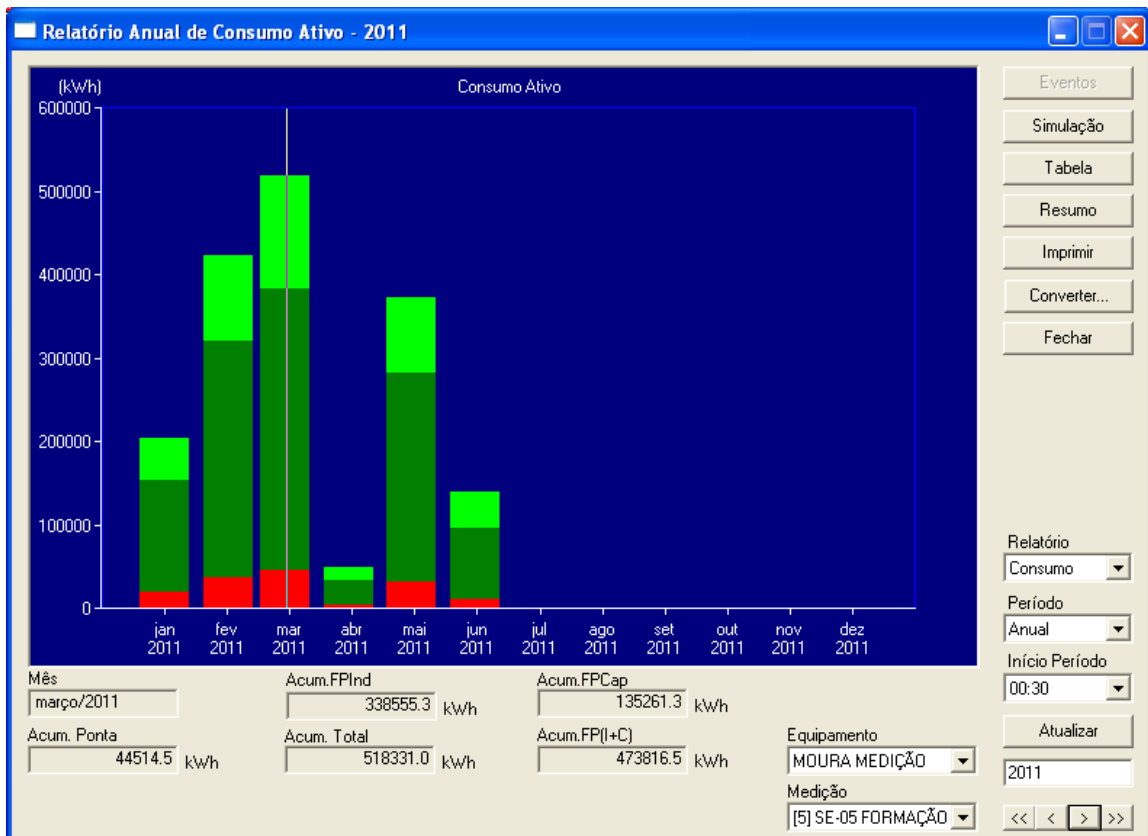


Figura 34-Gráfico do relatório Anual de Consumo Ativo de 2011 até junho, na Acumuladores Moura.

Outra variável importante na análise energética da Seção 05 da formação que influencia na escolha da tecnologia a ser utilizada na retificação do sistema é a distorção harmônica total. Um estudo de qualidade de energia foi realizado na fábrica por uma empresa terceirizada em 30/06/2011 e sobre o THD na Seção 05 o relatório de análise da empresa [14] verifica situações críticas com relação à presença de alto conteúdo de distorção harmônica de corrente e de tensão, mais notadamente no neutro, chegando a ser 200% da corrente de linha do sistema. Para a empresa que realizou os testes, os fatos geradores são cargas monofásicas com desequilíbrio de corrente, a presença do terceiro harmônico exclusivamente no neutro e o fato das cargas estarem muito desequilibradas. Analisando os resultados do relatório feito pela empresa terceirizada e os dados gerados pelas medições feitas com o PowerNET, são observadas semelhanças na análise da distorção harmônica total local. O THD é um fator influente na escolha do tipo de tecnologia a ser utilizada na etapa de retificação do sistema de formação de baterias. As vantagens e desvantagens no uso de cada tecnologia com relação ao THD também serão usadas como critério de avaliação no comparativo entre as tecnologias, discutido na seção 6, e na conclusão do trabalho.

## 6.2. Simulações

Com o intuito de analisar os resultados dos testes realizados pelas empresas e discutidos na seção 4, realizou-se a simulação dos circuitos utilizados nesses testes e disponibilizados pelas empresas. O *software* PSIM foi usado como ambiente de simulação. Além dos circuitos descritos na seção 4, outras simulações foram feitas e também serão apresentadas nessa seção a fim de complementar a análise comparativa entre as tecnologias avaliadas.

O primeiro circuito simulado, referente ao esquema apresentado na Figura 3, representa o sistema de retificação atual instalado na Moura e é mostrado na Figura 35. A alimentação trifásica é feita através de uma tensão de linha de 440Vrms. Para representar a carga do sistema, que é um conjunto de baterias, utilizou-se um capacitor com uma resistência pequena, que representa a própria resistência interna do circuito, e em paralelo uma resistência, cujo valor foi calculado como o resultado entre os valores médio de tensão e corrente, medidos ao longo de um período de formação e captados através do *software* supervisorio instalado na Seção 05, chegando ao valor aproximado de  $4,8\Omega$ .

Os valores da tensão e corrente de entrada, da tensão de saída retificada e do fator de potência são mostrados na Figura 36. Observa-se uma pequena ondulação na tensão de saída, que faz com que o valor observado no gráfico seja um pouco maior que a tensão contínua nos bancos de formação. Para esse circuito também foi medido o fator de potência, que apresentou valor médio de 0,32. O resultado do THD de corrente é mostrado na Figura 37.

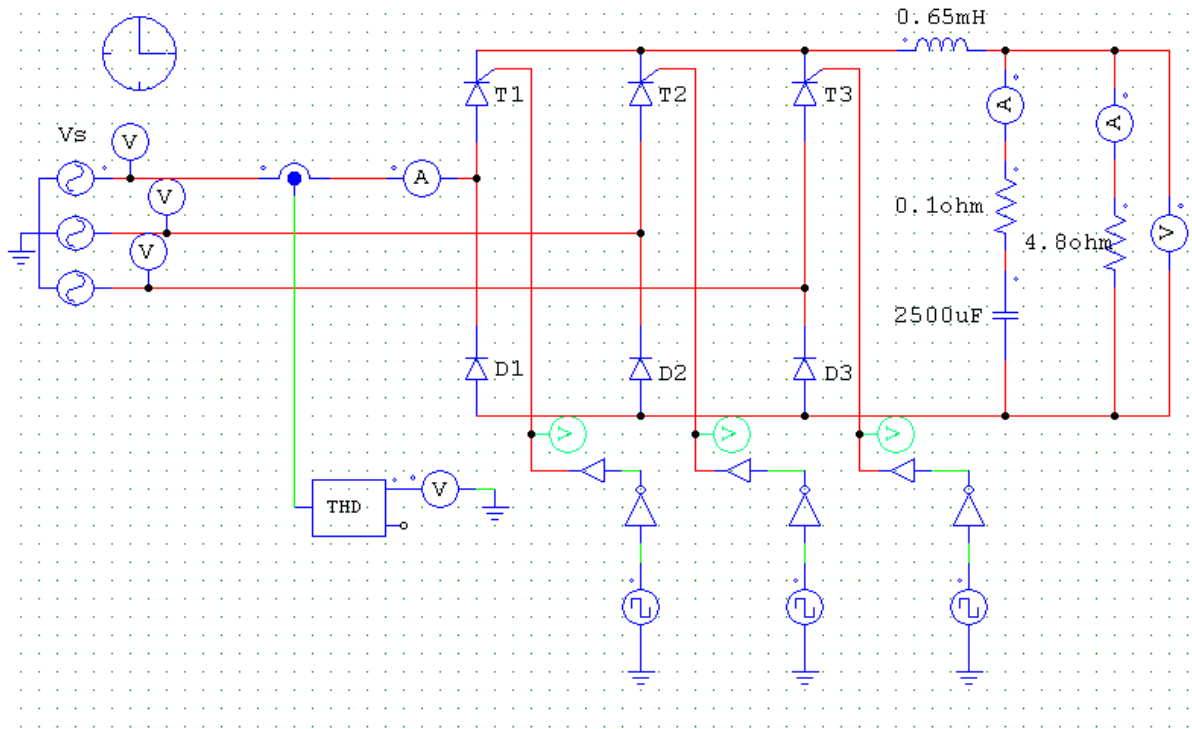


Figura 35-Circuito referente ao sistema de retificação com SCR.

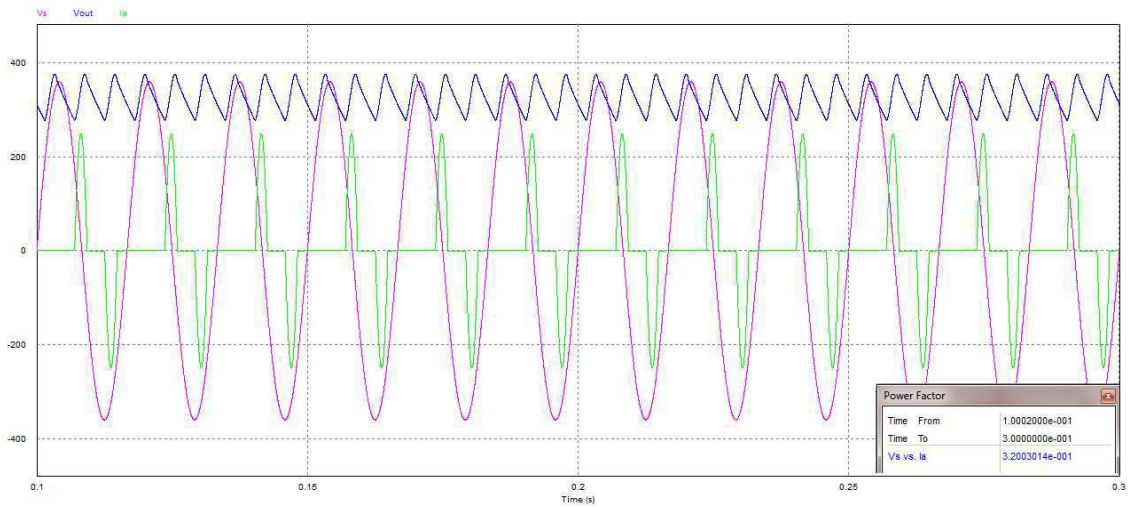
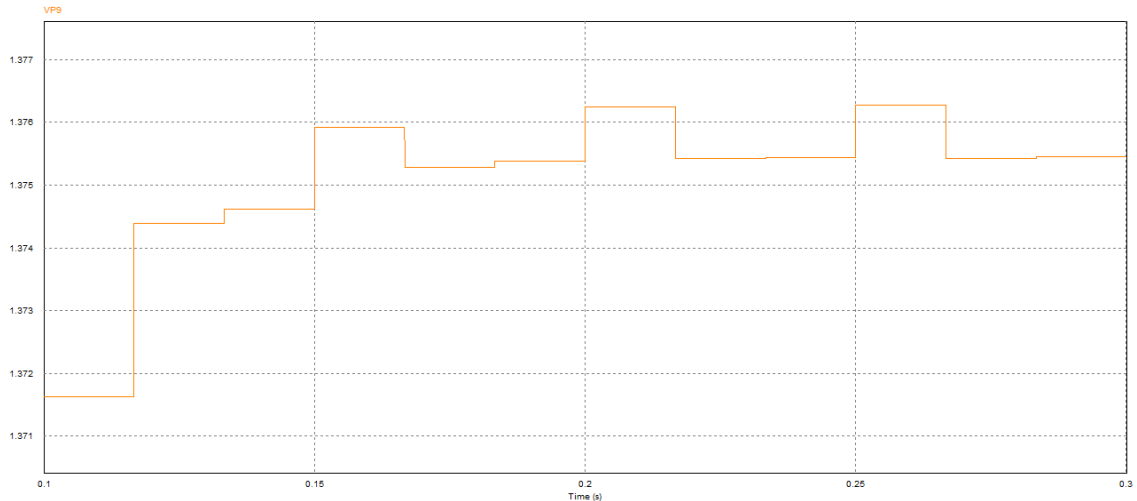


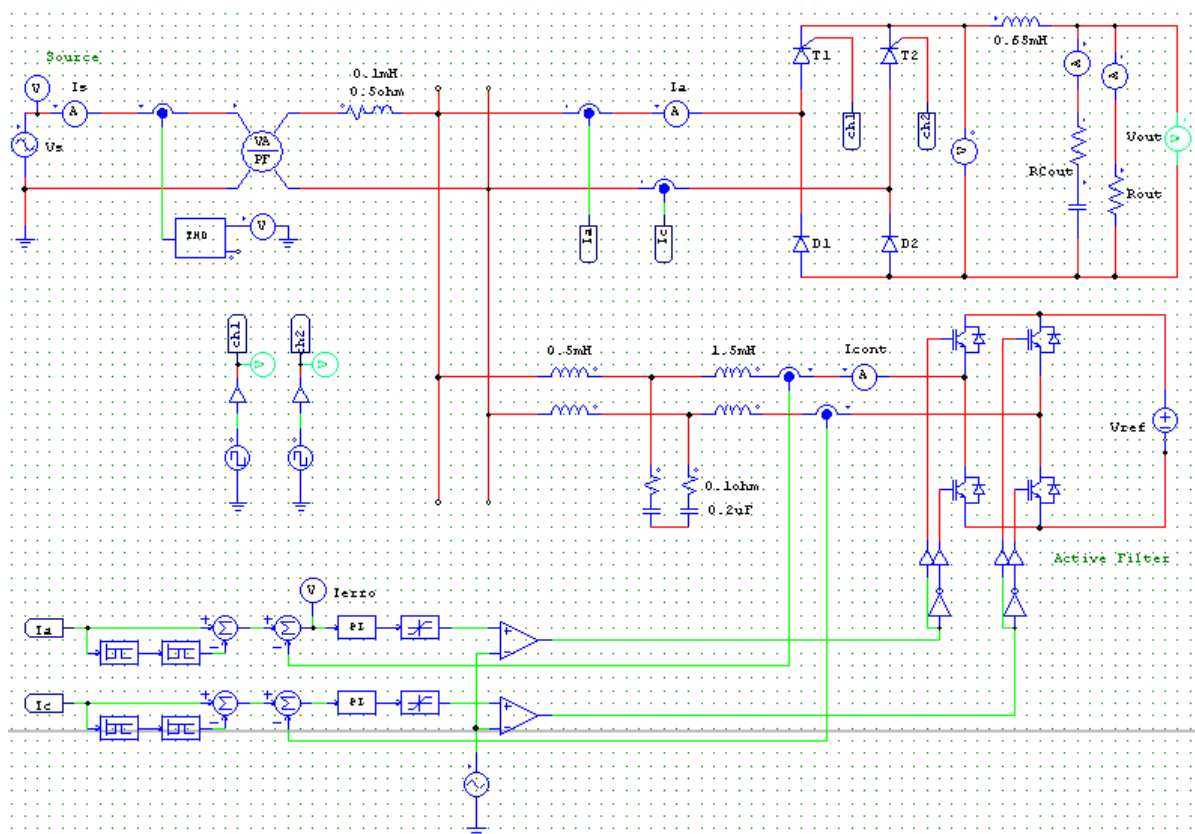
Figura 36-Tensão de entrada Vs, corrente da fonte is, fator de potência e tensão de saída retificada Vout no circuito retificador com SCR.





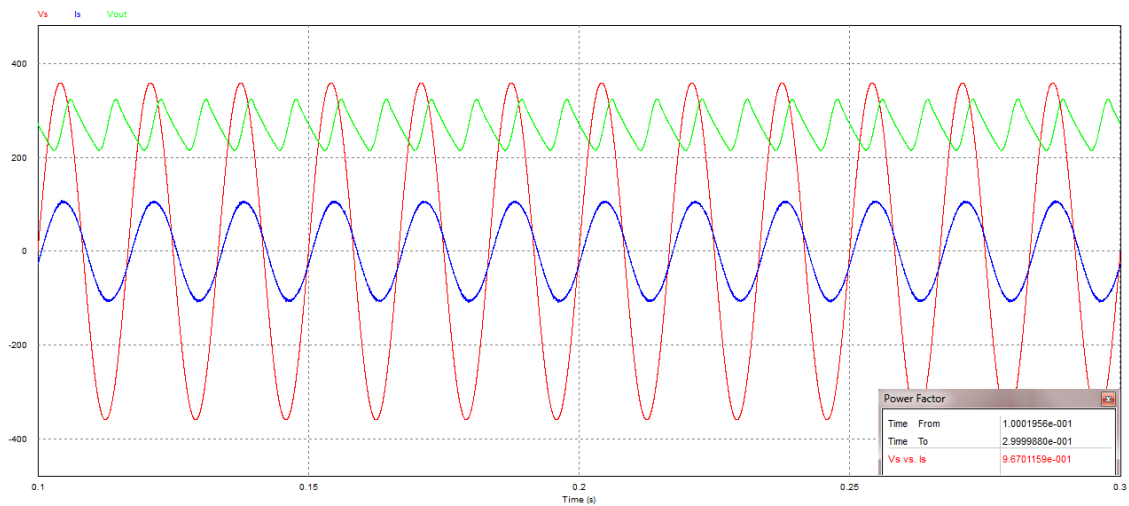
**Figura 37- THD de corrente do circuito retificador com SCR.**

É possível observar que os valores de fator de potência e do THD não são bons. O fator de potência tem um valor médio aproximado de 0,32 enquanto a distorção harmônica chega a um valor médio de 137,5%. O circuito apresentado na Figura 35 foi simulado novamente, agora com a adição de um filtro ativo. A intenção é observar se a inserção do filtro no sistema traria resultados melhores que os apresentados nas Figuras 36 e 37 para o THD e também para o fator de potência, o que poderia ser uma alternativa para o circuito instalado na Moura. O circuito monofásico referente ao circuito da Figura 3 com a adição do filtro ativo é apresentado na Figura 38.

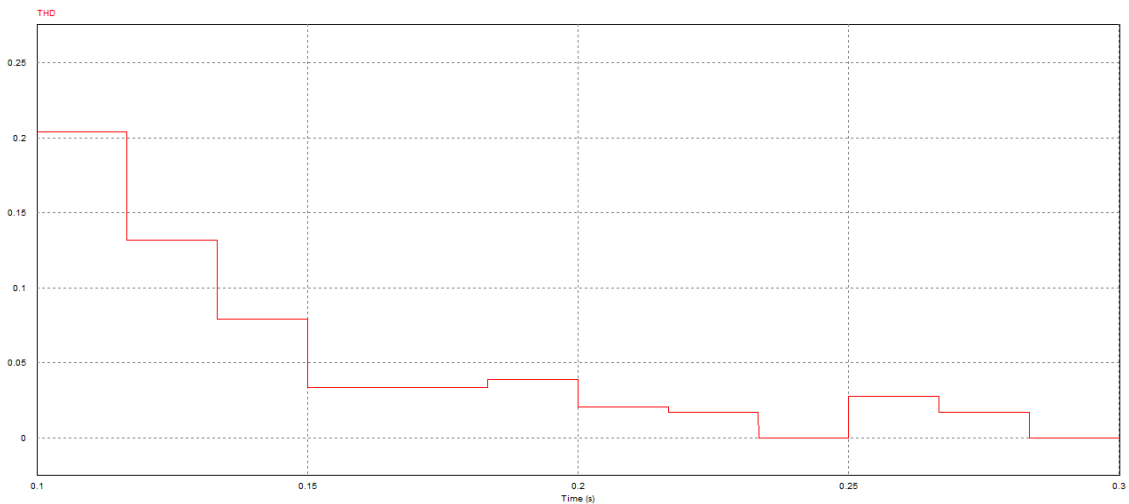


**Figura 38-Circuito referente ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo, simulado no PSIM.**

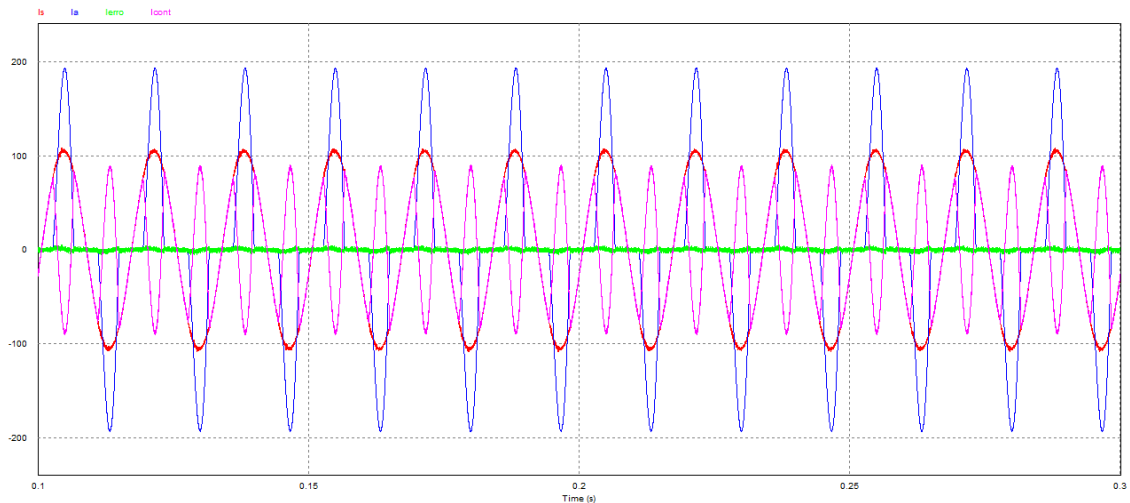
Com a adição do filtro ativo é possível observar uma melhora significativa nos valores do fator de potência, da distorção harmônica e no comportamento da corrente da fonte, apresentados na Figura 39. O fator de potência passa de 0,32 para 0,967, enquanto a distorção harmônica, que pode ser vista no gráfico da Figura 40, de 107% diminui para quase 3%. Na Figura 41, é possível observar a compensação da corrente de fase Ia através da corrente Icont, injetada pelo filtro ativo, fazendo com que a corrente de erro (Ierro) seja quase nula.



**Figura 39-**Tensão de entrada  $V_s$ , corrente da fonte  $I_s$ , fator de potência e tensão de saída retificada  $V_{out}$  no circuito retificador com SCR e filtro ativo.

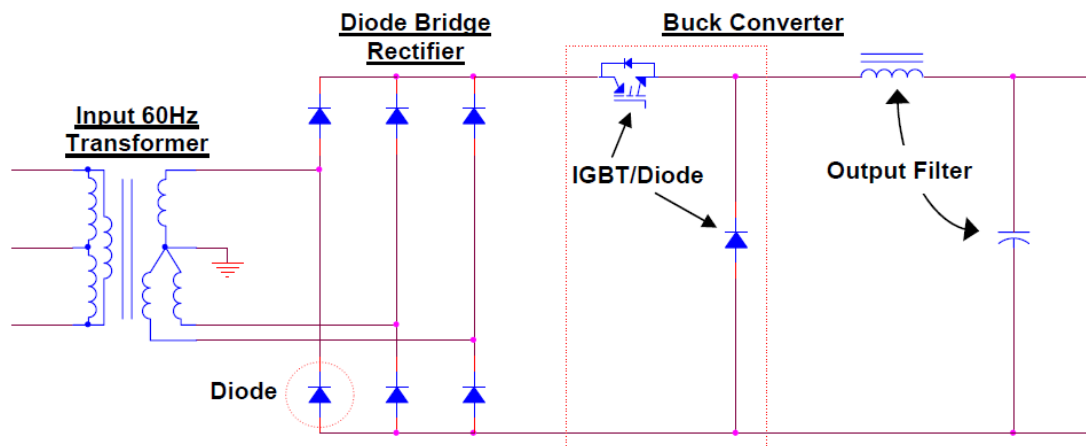


**Figura 40-** THD de corrente referente ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo.



**Figura 41-** Comportamento da corrente da fonte  $I_s$ , da corrente de fase  $I_a$ , da corrente de compensação do filtro  $I_{cont}$  e da corrente de erro  $I_{erro}$ , referentes ao sistema de retificação com SCR e filtro ativo.

Com relação ao retificador que utiliza o IGBT, o único circuito referenciado no material enviado pelas empresas contatadas é mostrado na Figura 42, no entanto, esse não é o circuito de um retificador controlado, e sim de um conversor abaixador (*buck*) que utiliza um IGBT como chave e um filtro na saída. Quando questionada a respeito do circuito retificador usado nos testes, uma das empresas (SoftSlim) apenas afirmou ter usado o circuito do conversor *buck* da Figura 42 como referência para o desenvolvimento do seu próprio retificador, e por questões de sigilo industrial não poderia disponibilizá-lo.



**Figura 42-** Conversos abaixador *buck* com IGBT, usado como referência pela SoftSlim. Fonte:[13].

Um circuito similar ao da Figura 42, disponibilizado como exemplo nos arquivos de instalação do *software* PSIM foi simulado com e sem a malha de controle, usada para realizar a compensação do fator de potência através do monitoramento da tensão de entrada do circuito e da corrente de saída da ponte retificadora. Os circuitos simulados com e sem a

malha de controle são mostrados na Figura 43 e os resultados da simulação são discutidos em seguida.

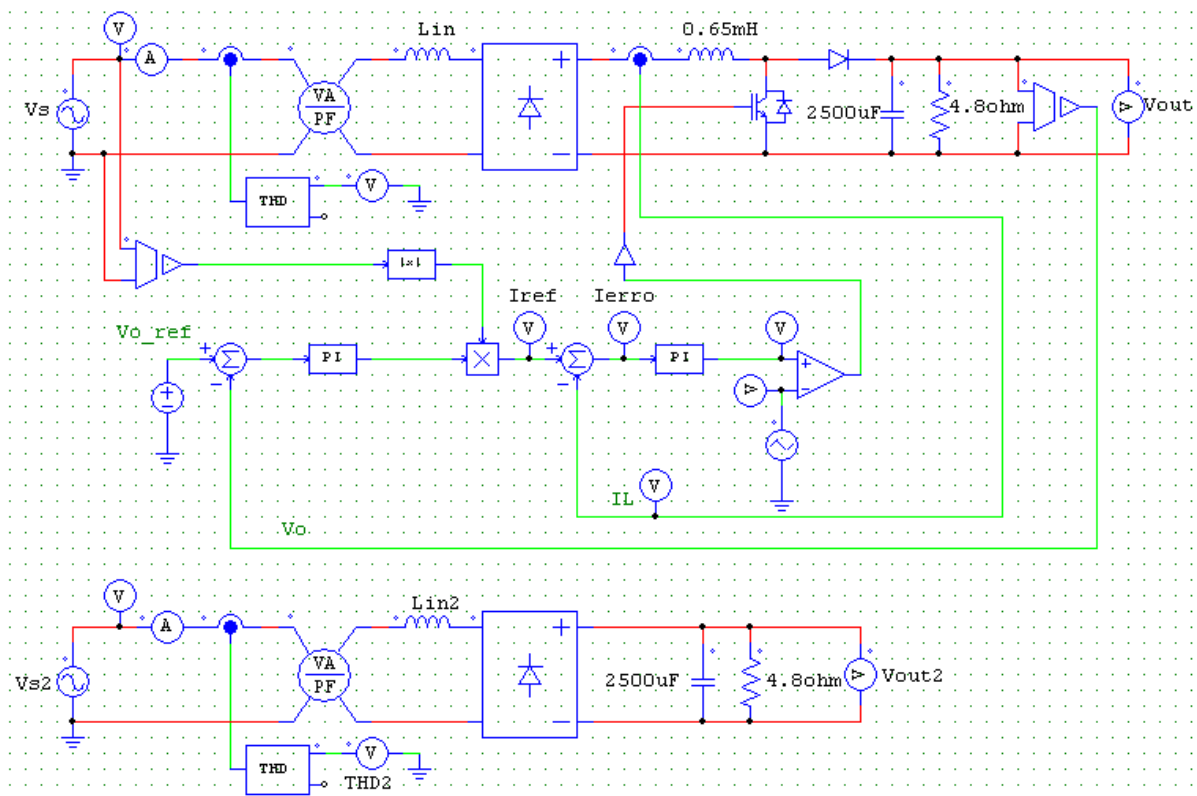
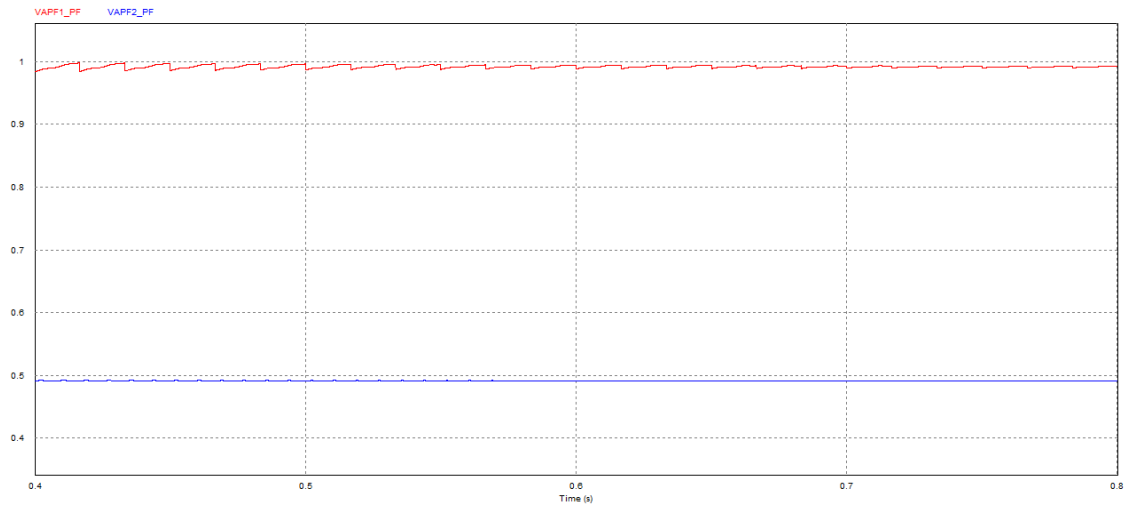


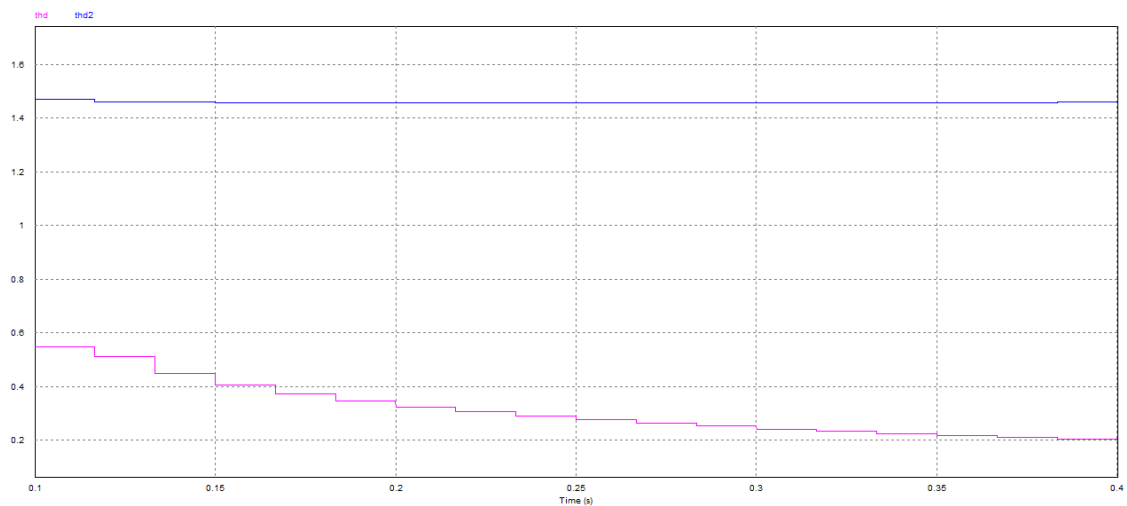
Figura 43-Circuito similar ao da Figura 43 simulado com e sem malha de controle.

O circuito foi simulado com os mesmos valores de referência do retificador a tiristor da Figura 35. Diferente do circuito apresentado pela Softslim, o circuito simulado é um conversor elevador, no entanto os resultados da simulação para o fator de potência, Na Figura 44, e THD, na Figura 45, mostram que com a inserção da malha de controle nesse circuito também é possível fazer uma compensação dos harmônicos e melhorar o fator de potência do sistema. Os circuitos acima simulados permitem a montagem de um sistema de retificação, com saída de tensão maior que a tensão de entrada, permitindo assim a formação de um maior número de baterias em um mesmo instante.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 44 e 45 é possível observar um aumento do fator de potência de 0,5 para aproximadamente 0,98 e a diminuição da distorção harmônica total de pouco mais de 140% para 20% após a inserção da malha de controle no circuito.

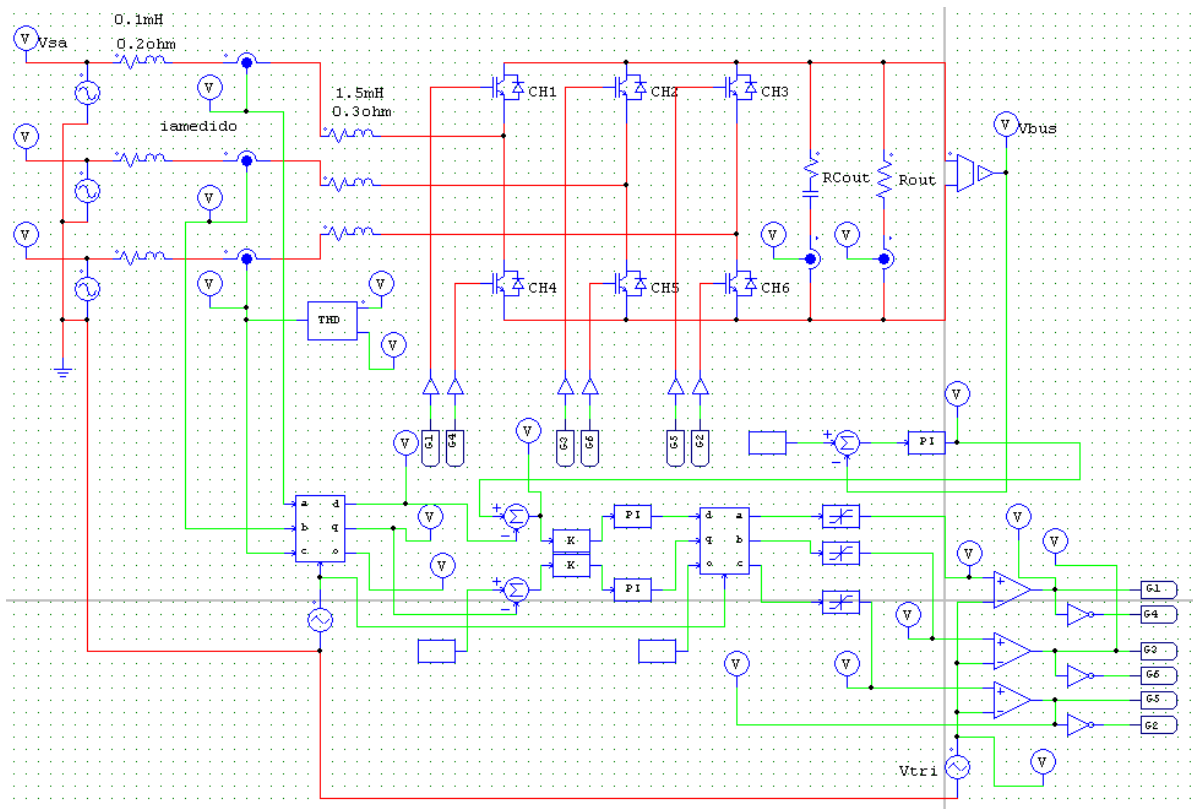


**Figura 44-** Comparativo entre o fator de potência do circuito com malha de controle VAPF1\_PF, e do circuito sem a malha de controle VAPF2\_PF.

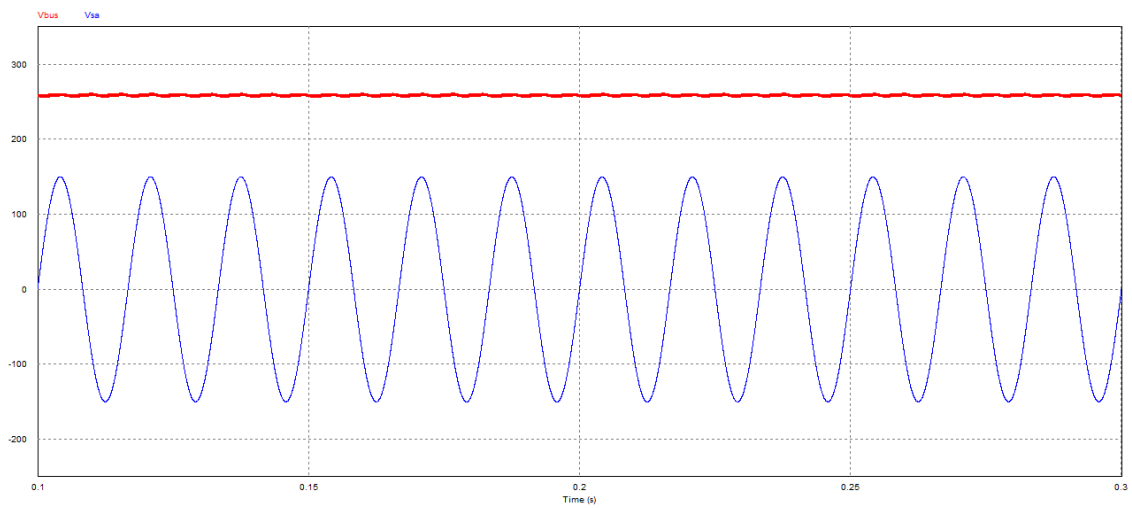


**Figura 45-** Comparativo entre o THD de corrente do circuito com malha de controle 'thd', e do circuito sem a malha de controle 'thd2'.

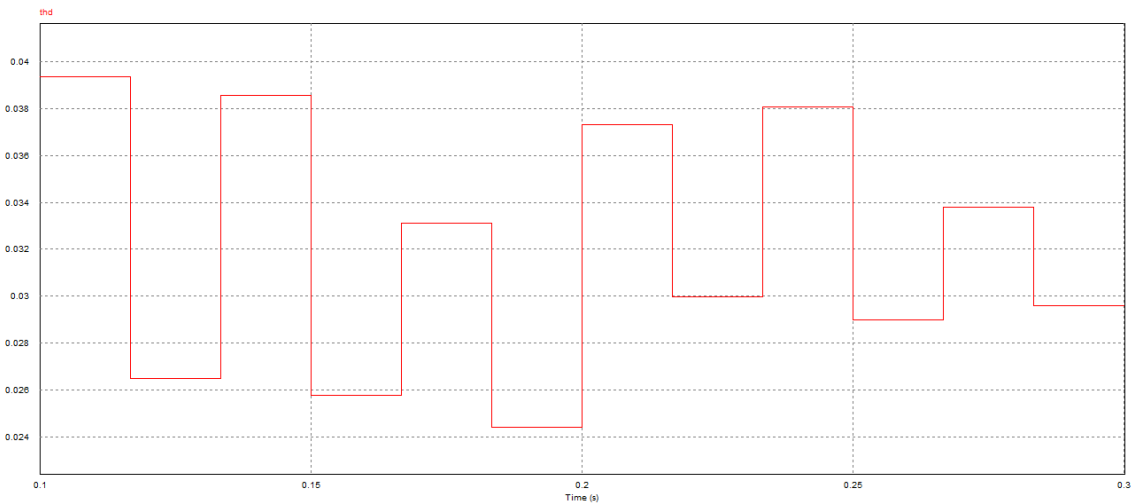
A última simulação feita foi a do retificador a IGBT mostrado na Figura 5. A simulação é apresentada na Figura 46, e os resultados da simulação são mostrados em seguida. Na Figura 47 é observado o valor de tensão de entrada e a saída retificada, que embora apresente uma ondulação, tem um valor médio próximo ao da tensão dos bancos de formação. A diminuição do THD é visível quando comparado ao circuito retificador a tiristor da Figura 36, enquanto com SCR a distorção apresenta valores em torno de 137,5% no circuito com IGBT diminui para aproximadamente 3,5%, valor similar ao do circuito retificador SCR com filtro ativo da Figura 38, que é de aproximadamente 2,5%. A mesma comparação é feita para os valores de fator de potência, onde os melhores resultados obtidos foram do circuito com SCR e filtro ativo, com fator de potência aproximado de 0,967 e do circuito com IGBT, cujo fator de potência foi de 0,95, ambos superiores ao fator de potência de 0,32 do circuito com SCR.



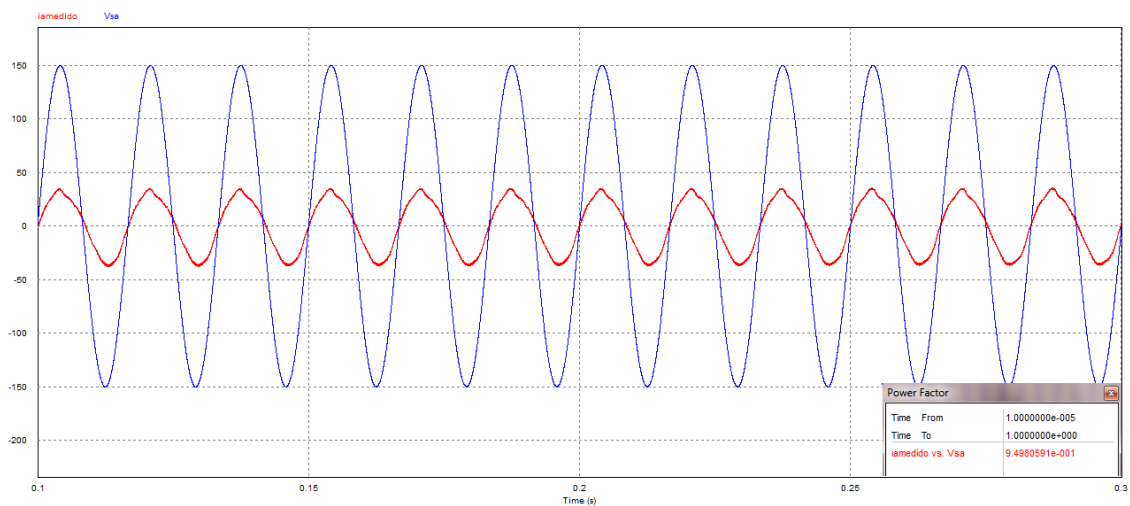
**Figura 46-Circuito com IGBT referente à Figura 5, simulado no PSIM.**



**Figura 47-Tensão de entrada Vsa e tensão CC de saída Vbus do circuito com IGBT.**



**Figura 48- THD de corrente do circuito com IGBT.**



**Figura 49- Tensão de fase corrente e fator de potência do circuito com IGBT.**

Após a realização das simulações e utilizando os valores dos testes feitos na Moura e dos resultados dos testes das empresas apresentados na seção 4, é possível fazer um comparativo entre as características de cada tecnologia, que irá auxiliar na avaliação final do desempenho de cada uma. O comparativo é apresentado na seção 6.3, após o mesmo são apresentadas as conclusões do trabalho na seção 7.

### **6.3. Comparativo entre as tecnologias**

De acordo com os estudos realizados pela *Digatron firing circuits* [11], o uso do IGBT provê controle de alta velocidade e chaveamento de 20 ms entre carga e descarga. A descarga de energia é regenerada de volta à fonte de alimentação com eficiência de 94,2% e um fator de potência quase unitário. O tiristor também provê controle de alta velocidade com chaveamento de aproximadamente 2s entre carga e descarga e a descarga de energia

também é regenerada de volta à fonte de alimentação com 91,2 % de eficiência, mas a um fator de potência 0,8 aproximadamente.

Do que foi exposto pelas empresas e obtido nos testes realizados na Moura é possível identificar alguns aspectos positivos e negativos no uso de cada uma das tecnologias. O SCR traz vantagens por ser mais robusto, com grande utilização na indústria. É a tecnologia atual instalada na Seção de formação da Moura, o que facilita o trabalho dos operadores que já estão acostumados a trabalhar com o sistema instalado. Os módulos individuais montados com SCR, como os que são mostrados na Figura 9, são mais baratos do que os módulos com IGBT, que chegam a custar mais do que o dobro. No entanto, para os módulos com SCR também se faz necessário uso de equipamentos para correção do fator de potência e compensação de reativos, que têm custo elevado, encarecendo a instalação. Por outro lado, o uso dos módulos com IGBT aumenta a eficiência no processo, com economia de até 30% [13] de energia a um fator de potência quase unitário. Alguns estudos também apontam melhora no desempenho e qualidade da bateria formada. É uma tecnologia que dispensa o uso de equipamentos para compensação de reativos, embora seja menos utilizada e mais cara que a citada anteriormente.

É necessário observar que o tipo de carga utilizada nas simulações foi apenas uma aproximação do que seria o comportamento de uma bateria, já que esse comportamento varia ao longo do período de formação, sendo difícil reproduzi-lo no ambiente de simulação do PSIM. Como visto no gráfico apresentado na Figura 14, durante a formação da bateria há períodos irregulares de carga e pausa, motivo que dificulta essa reprodução de comportamento no ambiente de simulação. Utilizou-se então os valores de tensão e corrente obtidos durante os testes realizados na Seção 5 de formação através do PowerNET para se chegar a um valor médio de resistência, que com um capacitor, foi utilizado para representar a carga do sistema.

Nas simulações feitas e apresentadas na seção 6.2, os resultados obtidos não foram os mesmos dos da seção 4. Mesmo apresentando diferenças em seus resultados, todas as empresas apontaram a tecnologia IGBT como sendo mais vantajosa seja em economia de energia ou na qualidade da bateria formada. Esse, porém, não foi o resultado absoluto obtido nas simulações. Um fator importante a ser destacado é o não fornecimento do circuito que utiliza o IGBT usado para o teste das empresas. Como dito anteriormente, o único circuito com IGBT ao qual se teve acesso através dos documentos enviados pelas empresas esta representado na Figura 42 e trata-se apenas de um esquema usado como referência para o desenvolvimento dos seus sistemas, que por questão de sigilo industrial não puderam ser disponibilizados.

Analizando o circuito simulado que utiliza o SCR na retificação, esquema de instalação atual da Moura, apresentado na Figura 35, os resultados obtidos também não são iguais àqueles obtidos durante os testes efetuados com o PowerNET na Seção 5 de formação. É possível observar diferenças no valor de fator de potência medido durante os testes, cujo valor mais alto registrado foi de 0,94, e no obtido na simulação, que apresentou valor médio de 0,32. Há diferença também na distorção harmônica, cujo valor máximo registrado nos testes foi de 80%, bem menor que o valor médio registrado na simulação, que foi de 137,5%. Esses resultados apontam diferenças entre o circuito físico instalado na Seção 5 de formação da Moura e o circuito simulado. A utilização de um filtro ativo pode ter sido um dos elementos ignorados durante os testes realizados na formação e que poderia justificar a discrepância entre os valores teóricos e práticos para o fator de potência e THD discutidos anteriormente. Com a inserção de um filtro ativo no segundo circuito simulado (Figura 38) o valor do fator de potência melhorou consideravelmente, atingindo valor médio de 0,967, bem próximo aos valores registrados pelo PowerNET nos testes, que chegam a 0,945. O valor da distorção harmônica total também é reduzido a valores próximos a 2%,



melhor que o registrado no teste da Seção 5 para o circuito com SCR, e também no teste realizado pela Digatron para o circuito com IGBT (Figura 25), que apresentou THD médio de 13%.

Quanto aos valores obtidos na simulação para o circuito semelhante àquele utilizado como referência para o desenvolvimento dos sistemas utilizados nos testes da Softslim (a Digatron não disponibilizou nenhuma referência do circuito retificador com IGBT usado nos seus testes), mostrado na Figura 43, apresentaram valores distantes daqueles discutidos na seção 4. O fator de potência chegou ao valor médio de 0,54 (Figura 44) e a distorção harmônica total, à média de 145% (Figura 45), enquanto os valores referenciados pela Digatron, por exemplo, são de 0,98 para o fator de potência e de 13% para o THD (Figuras 24 e 25). No entanto, ao inserir nesse circuito uma malha de controle, os valores de fator de potência e distorção harmônica tornam-se compatíveis aos referenciados pela digatron, quando mudam para 0,98 e 20%, respectivamente. Já o circuito simulado para o retificador a IGBT, na Figura 46, apresenta resultados coerentes com os testes realizados pela Digatron, já que o THD aproximado visto no gráfico da Figura 48 foi de 3,5% e o fator de potência médio para o circuito foi 0,95, resultado que mesmo sendo bom, ainda não é melhor que àquele referente ao circuito do SCR com filtro ativo.

Nos gráficos das Figuras 33 e 34 são apontados os meses onde houve o maior consumo ativo na Seção 05 de formação em 2010 e 2011, respectivamente. Os valores dos gastos de energia desses meses serão usados como referência para uma comparação dos gastos associados tanto à implantação de uma Seção de formação como ao consumo de energia elétrica nessa Seção, seja utilizando módulos de retificação com SCR ou IGBT.

Baseado nos resultados dos testes das empresas, expostos na seção 4, utilizou-se como referência para os cálculos uma economia média de 15% no custo de energia elétrica com o uso do IGBT. O valor de referência de um módulo individual com SCR é o valor atual aproximado de fabricação do módulo instalado na Seção 05 de formação da Moura, enquanto o valor de referência de um módulo individual com IGBT é o valor atual cobrado pela empresa Softslim. Utilizando a quantia de R\$ 0,24 por quilowatt hora consumido na formação, em seguida são feitos os cálculos de consumo e economia para um mês de formação na Seção 05 de formação da Moura, bem como valores de referência para futuras instalações com ambas as tecnologias avaliadas, usando os valores dos gráficos 33 e 34 como referência.

#### ➤ **Consumo de energia-Seção 05**

- Valor do kWh: R\$0,24
- Junho 2010: 456.421kWh → R\$109.541,04
  - Economia de energia com o uso do IGBT: R\$ 16.431,16
- Março 2011: 518.331kWh → R\$124.399,44
  - Economia de energia com o uso do IGBT: R\$18.659,92

#### ➤ **Valores de referência para instalação**

- Valor do Módulo individual (SPM) com SCR: R\$1.850,00
- Sistema de Compensação de Reativos: R\$110.000,00
  
- Valor do Módulo individual com IGBT: R\$4.000,00

- Nova seção de formação: 50 bancos, 650 módulos individuais:
  - Custo de instalação com IGBT: R\$2.600.000,00
  - Custo de instalação com SCR: R\$1.312.500,00

Com os valores de referência acima, é possível observar que o custo do módulo individual com SCR é menor que o módulo individual com IGBT, mas a compensação de reativos só se faz necessário no sistema com SCR. Para a instalação de 50 bancos de formação são necessários 650 módulos individuais, já que a cada banco de formação estão relacionados 13 circuitos com um módulo cada. Para o retificador com SCR deve ser acrescido o valor do sistema de compensação de reativos, que no caso do utilizado na Moura, tem um valor aproximado de R\$110.000,00. O custo total foi apresentado acima: R\$2.600.000,00 para o sistema com IGBT e R\$1.312.500,00 para o sistema com SCR.

Os resultados relacionados à economia de energia elétrica com o uso de cada tecnologia avaliada variaram de 5% a 30%. Decidiu-se escolher pelo valor médio de economia encontrado nos testes da Softslim, por terem sido feitos no Brasil e onde as duas tecnologias foram avaliadas simultaneamente em um ambiente similar ao encontrado na Moura. Adotou-se então o valor de 15% para a economia de energia com o uso do IGBT no lugar do SCR no sistema de retificação, obtendo os resultados mostrados anteriormente: R\$ 16.431,16 de economia no mês de maior consumo de energia em 2010 e R\$18.659,92 no mês de maior consumo de energia em 2011, alcançando uma média de R\$17.545,54 de economia. Desses dados é possível concluir que o retorno do investimento feito na nova Seção de formação quando usado módulos com SCR, com a economia de energia, acontece depois de aproximadamente seis anos, enquanto o retorno caso sejam usados os módulos com IGBT só acontecerá em aproximadamente doze anos.

A partir dessas e das outras análises discutidas nessa seção de comparação entre as tecnologias, mediante os resultados dos testes feitos na Moura, bem como dos resultados apresentados pelas empresas contatadas e das simulações executadas no *software* PSIM é possível chegar a algumas conclusões quanto às vantagens e desvantagens do uso de cada uma dessas tecnologias. Essas conclusões, análise das dificuldades encontradas na realização do trabalho, bem como as propostas para a continuidade do trabalho são apresentadas na seção 7.

## 7. Conclusão

Os retificadores controlados são utilizados para a obtenção de uma tensão contínua ajustável a partir da tensão alternada da rede de alimentação. Segundo algumas pesquisas, aqueles que utilizam tiristores para realizar o chaveamento, apresentam baixo fator de potência e alto conteúdo harmônico. Uma tendência atual é a busca por equipamentos que melhorem a eficiência energética, ou seja, que proporcionem alto fator de potência e baixo conteúdo harmônico. A substituição dos tiristores por chaves semicondutoras com capacidade de bloqueio, como os IGBTs, permitem a aplicação de técnicas de modulação com frequência de chaveamento superior à frequência da rede de alimentação, fazendo com que seja possível obter alto fator de potência e baixo conteúdo harmônico [6]. Os resultados dos testes enviados pelas empresas também mostraram que o uso do IGBT na etapa de retificação do processo de formação de bateria proporciona, além de economia nos gastos com energia elétrica, melhora no fator de potência e redução no conteúdo harmônico. Esse resultado não pôde ser totalmente comprovado mediante as simulações feitas, pelo fato de

não se ter acesso aos circuitos usados nos testes referentes aos ensaios com IGBT feitos pelas empresas contatadas, mas a um único circuito disponibilizado pela Softslim, de autoria da *Power Designers*, que é apenas uma referência usada por eles para desenvolver seu próprio retificador. Este, ao ser simulado, não apresentou resultados satisfatórios. Apenas quando foi adicionado de uma malha de controle, ou quando foi simulado o circuito mostrado na Figura 46, conseguiu-se resultados de acordo com o exposto na seção 4 para os retificadores a IGBT.

Os testes realizados na Moura também diferiram em alguns pontos mostrados pelas empresas. No gráfico da Figura 29 é possível observar que o fator de potência medido na Seção 5 de formação não foi tão baixo quanto o dos testes realizados pelas empresas e que pode ser observado no gráfico da Figura 24, por exemplo. O valor do THD medido na Moura teve um valor médio um pouco maior que o apresentado nos testes da Digatron na Figura 25, embora a diferença entre eles não seja grande. Há diferenças também na magnitude dos harmônicos dos testes feitos com SCR pela Digatron e apresentado no gráfico da Figura 17 e os valores obtidos pelo PowerNet nos testes da Seção 5 de formação, vistos no gráfico apresentado na Figura 32, sendo aqueles maiores que estes.

Na simulação feita com o circuito atualmente instalado na Moura é apresentado um valor de fator de potência inferior ao dos testes apresentados na seção 4, além de uma distorção harmônica maior que 100%. Quando o filtro ativo foi acrescentado ao circuito e nova simulação foi feita, o fator de potência atingiu os níveis encontrados nos testes feitos na Seção 5 de formação e a distorção harmônica foi reduzida a quase 2%. Esses resultados podem indicar que durante os testes executados na Moura algum equipamento instalado pode não ter sido levado em consideração no esquema usado para simulação, como um filtro ativo ou outro equipamento que auxiliasse na redução dos harmônicos e no aumento do fator de potência, o que explicaria a discrepância nos resultados. Outro fator a influenciar esses resultados também poderia ser a estrutura do filtro ativo usado na simulação.

Analisando o aspecto financeiro, de acordo com a implantação de uma nova seção de formação e os gastos associados ao uso de cada tecnologia, conclui-se que a substituição de um sistema baseado em SCR por outro baseado em IGBT não é recomendado, já que o retorno financeiro com a economia de energia causado pela mudança só acontece a longo prazo. Além disso, há também a necessidade de treinamento de operadores com uma nova tecnologia que não é tão conhecida deles como é o SCR, no caso da Moura. No entanto, a alternativa do uso do IGBT na etapa de retificação é válida para novos investimentos, tendo em vista todos os resultados positivos nos testes realizados com o uso dessa tecnologia, seja pelo fator financeiro ou qualitativo, já que com o uso dessa tecnologia consegue-se um melhor fator de potência e a diminuição da distorção harmônica total e do valor gasto com energia elétrica.

Algumas dificuldades durante a realização desse trabalho foram relatadas nas seções anteriores. Empedimentos durante as medições feitas na Seção 5 de formação; interrupções durante o período de formação que inviabilizaram algumas captações feitas pelo PowerNET e que ajudariam na análise; o sigilo industrial das empresas que disponibilizaram alguns dos seus testes, usados como fonte de pesquisa para a elaboração desse trabalho, que impediu uma análise mais abrangente e completa dos sistemas retificadores desenvolvidos por elas, podem ser citadas. Algo que ajudaria de forma determinante na avaliação da melhor tecnologia a ser adotada, por exemplo, numa nova seção de formação a ser instalada na Acumuladores Moura seria a instalação de ambos os sistemas de retificação, um módulo com SCR e um com IGBT na própria Seção 5 de formação onde os testes descritos nesse trabalho foram realizados. Essa seria uma forma eficiente de testar as particularidades de cada sistema, avaliar o desempenho da bateria formada por cada um deles, analisar o consumo de quilowatt-hora específico de cada sistema durante o período de formação em um

intervalo de tempo determinado. Outra sugestão que também auxiliaria na escolha da tecnologia mais eficiente a ser implantada na formação, porém não tão simples e rápida de ser implantada, seria a reprodução, através de *software*, do comportamento da bateria ao longo do período de formação, o que possibilitaria executar testes mais precisos não somente de comparação entre SCR e IGBT, mas de qualquer outra modificação ou implementação pensada para o processo, antes mesmo de executar testes físicos no local que custam tempo, dinheiro e algumas vezes podem atrapalhar o fluxo de operação industrial no local.

Como complemento, testes de qualidade das baterias formadas pelas duas tecnologias, tendo o cuidado de utilizar baterias “idênticas”, para que possíveis diferenças na quantidade de óxido de chumbo utilizado nas placas dessas baterias não venham a alterar os resultados, mascarando as funcionalidades avaliadas nos testes, também é algo que pode ser citado para ajudar no resultado da avaliação e, conseqüentemente, na escolha da melhor tecnologia.

## 8. Referências

- [1] Júnior, Antonio G. P.; Alves, Marcelo L. *Grupo Moura Baterias Automotivas*. Engenharia Corporativa Grupo Moura. 2009.
- [2] Cunha, Henza R. B. *Relatório de Integração-Unidade 01*. Grupo Moura, Belo Jardim, 23 de Dezembro de 2010.
- [3] RASHID, Muhammad Harunur. *Power Electronics – Circuits, devices and applications*. 2ª ed. Prentice Hall, New Jersey: 1993;
- [4] PENELLO, Luiz Fernando. *Filtro Ativo de Potência “Shunt”*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE: 1992;
- [5] Engenharia Corporativa-Acumuladores Moura. *Treinamento sobre Baterias Automotivas: Tópicos Temáticos*. Belo Jardim, 19 de março de 2008.
- [6] Venturini, Rodrigo. *Projeto de um Retificador monofásico microcontrolado com alto fator de potência*. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica. Vitória-ES, Março de 2007.
- [7] J. A. Pomilio. *Eletrônica de Potência- Cap.3*; DSCE-FEEC-UNICAMP; 2009.
- [8] Mohan; Underland; Robbins; *Power Electronics-Converters, applications and design*. Segunda edição.
- [9] Acumuladores Moura S/A; Departamento de Engenharia de Manufatura. *Descrição dos retificadores SPM, Formação-UN 01(Seção 05)*. Belo Jardim-PE. Dezembro de 2009.
- [10] IMS Power Quality, PowerNet P600. *Medidor e registradores de grandezas elétricas portátil. Manual de instalação e operação*. Novembro de 2009.

- [11] *An evaluation of formation charge power conversion technologies and their effect on battery quality and performance. Presented by Tony Schröer. Digatron firing circuits.*
- [12] Eco-Energy Solutions. Stephen Ache. *Total Battery Management Solutions. Power Designers, USA, LLC. [www.powerdesigners.com](http://www.powerdesigners.com).*
- [13] SoftSlim. *Descritivo do carregador e formador de baterias, micro controlado IGBT. Site: [www.softslim.com.br](http://www.softslim.com.br). Apucarana, Paraná, Brasil.*
- [14] RTA Rede de Tecnologia Avançada Ltda. *Relatório de análise: levantamento das características elétricas atuais da planta. Acumuladores Moura S/A. Julho de 2011.*
- [15] Nasser Kutkut, Ph.D. *IGBT Chargers Explained. Technical Note. PowerDesigners, LLC - Madison, WI.*
- [16] Silvia Helena Pini. *Estudo e implementação de um filtro ativo paralelo de dois quadrantes conectado no lado de corrente contínua de um retificador monofásico com filtro indutivo. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis-SC. 2010.*